



**BRUNO MONTOANI SILVA**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA ÁGUA  
NO SOLO CULTIVADO COM CAFEIEIRO NAS  
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA REGIÃO DO  
ALTO SÃO FRANCISCO (MG)**

**LAVRAS – MG**

**2012**

**BRUNO MONTOANI SILVA**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA ÁGUA NO SOLO CULTIVADO  
COM CAFEIEIRO NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ALTO SÃO  
FRANCISCO (MG)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Geraldo César de Oliveira

**LAVRAS – MG**

**2012**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Silva, Bruno Montoani.

Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com  
cafeeiro nas condições climáticas da região do Alto São Francisco  
(MG) / Bruno Montoani Silva. – Lavras : UFLA, 2012.

78 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Geraldo Cesar de Oliveira.

Bibliografia.

1. Umidade do solo. 2. Eficiência de uso. 3. Manejo do solo. 4.  
Variação espaço-temporal simultânea. 5. Sonda de capacitância. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.432

**BRUNO MONTOANI SILVA**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA ÁGUA NO SOLO CULTIVADO  
COM CAFEIEIRO NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ALTO SÃO  
FRANCISCO (MG)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de fevereiro de 2012.

Dr. Mozart Martins Ferreira

UFLA

Dr. Alberto Colombo

UFLA

Dr. Geraldo César de Oliveira  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2012**

*A Deus,*  
AGRADEÇO

*Aos meus pais Serlei e José, pelo exemplo de vida, apoio e motivação,*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo...

Ao Departamento de Ciência do Solo (DCS/UFLA), pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao professor Geraldo César de Oliveira, pela orientação, motivação, confiança e inúmeras boas conversas repletas de sabedoria e fomentadoras da construção de conhecimento.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

À banca examinadora, pelo pronto atendimento.

Aos professores do DCS, em especial, José Maria, Mozart, Nilton Curi, Carlos Alberto e João José pela motivação, sugestões e contribuições ao trabalho.

Aos funcionários do DCS, em especial a Dulce, Doroteo, Dirce, Maria Alice e Cleusa pela disposição e apoio.

Aos colegas do DCS, em especial, Walbert, Franciane, Teotônio, Fábio Satoshi, Alisson Lucrécio que contribuíram na realização deste trabalho, Paulo Boldrin e Walbert, pelas agradáveis horas de estudo, e Marla e Franciane, pelo apoio nos seminários.

À nossa equipe de trabalho, sempre disposta e prestativa, Érika Andressa, Larissa, Zélio, Samara, Elisa, Petrus, Carla, Vico e em especial, Milson Serafim, pelas sugestões, motivação e construção de conhecimento.

Aos professores do Departamento de Engenharia (DEG/UFLA), Alberto Colombo, Carlos Rogério, Élio Lemos e Antonio Marciano pelas sugestões e colaborações.

À FAPEMIG e Embrapa Café pelo financiamento do projeto.

À EPAMIG (em especial, ao pesquisador Paulo Gontijo, Mário Lúcio e Marcelo Murad) e Empresa AP (na pessoa dos Agrônomos Alessandro de Oliveira e Joyce Cristina Costa) pelo apoio logístico e auxílio em trabalhos de campo.

Aos familiares e amigos, pelo incentivo, apoio e confiança.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

**”Não sabia que era impossível, foi lá e fez”**

**- *Jean Cocteau***

**“Tudo o que já vi ensina-me a confiar no Criador para o que ainda não vi”**

**- *Ralph Emerson***

## RESUMO

No contexto da conjuntura de recursos hídricos cada vez mais escassos para fins de irrigação da cafeicultura na região do cerrado brasileiro, faz-se necessário investigar estratégias que visem o melhor aproveitamento da água armazenada no solo proveniente de chuvas, objetivando maior eficiência de seu uso. Nos últimos anos, surgiu na região do Alto São Francisco um sistema de manejo dos solos sob cafeicultura de sequeiro, cuja estratégia para mitigação do déficit hídrico na época seca é o condicionamento deste solo, objetivando maior exploração pelas raízes das plantas, o que propiciaria a utilização da água armazenada em profundidade. No entanto, as observações existentes sobre o sistema são empíricas, justificando estudos mais aprofundados sobre a distribuição hídrica no perfil destes solos. Assim, objetivou-se neste trabalho estudar a dinâmica espaço-temporal do conteúdo de água armazenado no solo, sob cafeicultura em sistema de manejo diferenciado. Inicialmente foi avaliada a acurácia das medidas de umidade, em sequencia, foi proposta a calibração para uma sonda de multi-sensores de capacitância para distintas camadas do solo que provavelmente sofrem maior interferência do manejo, e, na confiança de uso de dados consistentes de umidade de solo, foi realizado um monitoramento contínuo, num mesmo local e no perfil do solo. Como resultado foi gerada uma superfície contínua profundidade x tempo, que permitiu inferências sobre camada do solo em que houve maior atividade de raízes extraindo água, correlacionado com o manejo do solo adotado. Houve água potencialmente utilizável pelas plantas em profundidade, sinalizando sua possível contribuição para diminuição do estresse hídrico às plantas devido ao período seco marcante e veranicos.

**Palavras-chave:** Uso eficiente de água. Cafeicultura de cerrado. Adequabilidade ao uso de Latossolos.

## ABSTRACT

In the context of the situation of water resources becoming increasingly scarce for irrigation of coffee production in the cerrado region of Brazil, it is necessary to investigate strategies aimed at better utilization of water stored in the soil from rain, aiming at greater efficiency of its use. In recent years appeared in the region of Alto São Francisco a management system with no irrigation to soils under coffee whose strategy for mitigation of drought in the dry season is conditioning soil aiming at further exploration of this soil by plant roots, which would result in water use stored in depth. However, the observations available about this system are empirical, justifying deeper studies on the distribution of water in the soil profile. Thus, this work aimed to study the spatio-temporal dynamics of water content stored in the soil under coffee in differentiated management system. Initially we evaluated the accuracy of measurements of soil moisture and has been proposed calibration for amulti-sensors capacitance probe for different soil layers more likely to suffer interference from management and later trusting we are using consistent data for soil moisture was carried out continuous monitoring, in one place and in the soil profile. Was generated as a result a continuous surface depth x time, allowing inferences about soil layer in which there was increased activity of roots extracting water, correlated with soil management adopted. There was potentially usable water by plants in depth, indicating its possible contribution to decrease of water stress to plants due to the remarkable dry period and “veranicos” (short dry periods during the wet season).

**Key words:** Water use efficiency. Cerrado coffee. Oxisol use and management.

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	11
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Introdução Geral</b> .....	12
<b>1.2 Objetivos</b> .....	15
<b>1.3 Organização da dissertação</b> .....	15
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	17
<b>SEGUNDA PARTE - ARTIGOS</b> .....	20
<b>ARTIGO 1. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em latossolo manejado com cafeeiros</b> .....	21
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	34
<b>CONCLUSÕES</b> .....	41
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	42
<b>ARTIGO 2. Avaliação espaço-temporal do conteúdo de água no perfil do solo</b> .....	53
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	55
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	58
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	61
<b>CONCLUSÕES</b> .....	68
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	69

**PRIMEIRA PARTE**

**POTENCIALIDADES DE UM SISTEMA DE MANEJO EM MITIGAR O  
DÉFICIT HÍDRICO EM LAVOURAS CAFEEIRAS DE SEQUEIRO**

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Introdução Geral**

No Brasil o plantio de café estende-se desde o Paraná até o Pará, passando por São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Espírito Santo, Bahia e Rondônia. Em cada estado existem regiões aptas para o cultivo, com distintas condições edafoclimáticas e diversos sistemas de cultivo adotados por cafeicultores com diferentes níveis tecnológicos. Particularmente nos últimos anos com a elevação dos preços do produto café, houve uma motivação dos produtores para a busca de inovações nas práticas de cultivo, demandando o desenvolvimento de novas tecnologias (SERAFIM, 2011).

Na região do Alto São Francisco em Minas Gerais o grupamento de solos mais utilizado para a cafeicultura é o dos Latossolos, justificado principalmente pelo relevo suavizado onde estão inseridos, o que favorece sobremaneira a mecanização. No entanto esses solos possuem limitações químicas ao longo de todo o perfil (LOPES; COX, 1977; LOPES; GUILHERME, 1994), com destaque para os baixos teores de Cálcio e elevados teores de Alumínio, principalmente em sub-superfície (RAIJ, 1988), o que limita o maior desenvolvimento das raízes e deixa as lavouras mais susceptíveis a déficits hídricos e incapazes de absorver água e nutrientes em maiores profundidades, (GUIMARÃES, 1992) condicionando reduções em seus potenciais produtivos, carecendo, portanto, de práticas de manejo que propiciem o seu melhor uso.

Do ponto de vista físico, entretanto, a maioria dos Latossolos da região do cerrado apresentam boas condições. Isto se dá porque em seu domínio argiloso predominam óxidos e hidróxidos, destacando o mineral Gibbsita (hidróxido de Alumínio), que confere ao solo uma macroestrutura do tipo

granular (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999), que proporciona uma elevada permeabilidade e baixa densidade aos mesmos. Normalmente estes solos apresentam ainda uma boa capacidade de armazenamento de água quando se considera que são solos geralmente profundos.

Desse modo, vencidas as limitações químicas ao cultivo do cafeeiro, salienta-se o potencial de uso dos Latossolos, representado pela elevada profundidade efetiva. Esse atributo torna-se ainda mais importante, tendo em vista que as condições climáticas da região não são totalmente favoráveis ao adequado suprimento hídrico exigido pelo cafeeiro, o que possibilita a ocorrência de maiores riscos de seca edafológica.

A região do Alto São Francisco, segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (2005), apresenta clima semi-úmido com 4 a 5 meses secos, e deficiência hídrica anual (dha) entre 100 a 400 mm, sendo assim a região pode ser classificada como de apta a restrita para a cultura do café, segundo Costa, Antunes e Santana (1986), Evangelista, Carvalho e Sedyama (2002) e Souza et al. (2003) alertam que mais de 33% das áreas da Bacia do Rio São Francisco no estado de Minas Gerais só apresentam aptidão hídrica para o café Arábica se irrigadas. Isso é atribuído, além da dha, aos frequentes veranicos característicos da região, onde a disponibilidade de água se torna limitante, depauperando as plantas e refletindo na produção.

Por outro lado há situações em que o conflito pelo uso da água vem se tornando limitante ao uso e demanda da água para irrigação, o que implica que em alguns locais já não é possível outorgar recurso hídrico para irrigação. Pelo último levantamento realizado pela ANA em 2007, a região hidrográfica do São Francisco apresentou 22% do total da vazão outorgada no país, correspondendo a um valor próximo de 800 m<sup>3</sup>/s, e destes, aproximadamente 600 m<sup>3</sup>/s outorgados para fins específicos de irrigação (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2011). Como situações como esta tendem a se intensificar no

futuro, faz-se necessário, para a manutenção do sucesso da cafeicultura do cerrado, o uso de estratégias de manejo que possibilitem a mitigação de déficit hídrico, objetivando a melhor eficiência dos recursos hídricos.

Em cultivos não irrigados a entrada de água no solo é prioritariamente função da precipitação pluvial, e em escala variável, tem-se a contribuição oriunda da ascensão capilar. Dessa forma, as estratégias para uso eficiente da água em sistemas agrícolas de produção devem focar a maximização do uso dessa água armazenada no solo, que pode corresponder a até 38% de toda a água doce superficial de fácil acesso do planeta (TEIXEIRA et al., 2000). Dentre essas estratégias, destaca-se no âmbito de manejo do solo, e de forma ampla: *i*) aumento da retenção de água no solo na faixa de disponibilidade à planta pela incorporação de matéria orgânica (DALMAGO et al., 2009) e alteração da dinâmica de poros pelo sistema de preparo do solo (BAMBERG et al., 2011; LEÃO et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2004; DALMAGO et al., 2009), otimizando os poros capilares; *ii*) maximização da infiltração e minimização do escoamento superficial (deflúvio) da água no solo, pela utilização de barraginhas (BARROS, 2000), mulching vertical (DENARDIN et al., 2008; GARCIA, 2005), e uso de cobertura vegetal interceptando e reduzindo impacto da gota de chuva; *iii*) redução da evaporação e elevação da umidade superficial, principalmente nas fases iniciais da cultura em que o solo é mais exposto, pela manutenção de cobertura vegetal morta, criando condições favoráveis para redução da perda de água das camadas mais superficiais do solo (MOTA et al., 2011; STONE et al., 2006; PEREIRA; MOREIRA; KLAR, 2002; BRAGAGNOLO; MIELNIKZUK, 1990); e *iv*) condicionamento do solo visando uma maior exploração do perfil do solo pelo aumento do crescimento e distribuição radicular, buscando água em camadas do solo mais profundas, que sofrem menos efeito da evaporação (RAGASSI, 2007; RAIJ, 2008; CARLESSO, 1995; McCULLEY et al., 2004). Cabe ressaltar, entretanto, que a

adoção das estratégias de minimização de efeitos de estiagens deve ser em função, dentre outros fatores, da cultura em questão.

Assim, no contexto exposto da cafeicultura de Cerrado, a estratégia da melhoria das condições para o aprofundamento radicular se mostra promissora, pelo grande potencial físico-hídrico dos solos a ser utilizado, desde que vencidas as limitações químicas dos mesmos, o que se faz pelo manejo adequado.

Neste estudo busca-se confirmar o potencial de técnica considerada inovadora em uso na região do Alto São Francisco, cabendo conhecer a dinâmica do armazenamento de água em solos submetidos a essas condições de manejo, buscando atestar se há efetivamente uso de água pelas plantas em profundidade no solo, na época de estiagem.

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho foram: 1. Conhecer a dinâmica do armazenamento da água no solo, em um Latossolo Vermelho gipsítico-oxídico sob manejo com cafeicultura utilizando práticas de condicionamento do perfil do solo em ambiente de Cerrado; 2. Subsidiar informações de conteúdo de água com dados contínuos e consistentes, e para isto realizou-se a avaliação da acurácia e a calibração de uma sonda de multisensores de capacitância.

## **1.3 Organização da dissertação**

O trabalho foi dividido em duas partes, sendo a primeira composta de uma introdução geral e a segunda composta de dois artigos.

O primeiro artigo trata da avaliação da acurácia de sondas de multisensores de capacitância (MCP) em realizar medidas do conteúdo de água do solo com calibração de fábrica, mostrando a importância de se realizar

calibração nesses instrumentos para as condições de solos brasileiros do cerrado altamente intemperizados. Como o manejo do solo pode interferir nas propriedades dielétricas do solo, necessitando-se assim de calibrações específicas em função dessas alterações, foram realizadas distintas formas de calibração e avaliação da acurácia após esses procedimentos, sugerindo calibrações em função das situações de manejo avaliadas.

No segundo artigo foi estudada a dinâmica espaço-temporal do conteúdo de água armazenado no solo, inferindo sobre a extração de água ao longo do perfil pelas plantas e pelos fatores climáticos. Para isso foi utilizada uma ferramenta proposta, que emprega técnicas de geoestatística aliado ao monitoramento contínuo da umidade do solo por meio de sondas de perfil com multi-sensores de capacitância. Salienta-se a importância de se conhecer em sistemas cultivados, o efeito do manejo em condicionar o aprofundamento do sistema radicular das plantas, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento vegetativo, onde em condições climáticas com estação seca pronunciada as plantas estão sujeitas a déficit hídrico, salientando-se no contexto de uso eficiente dos recursos hídricos, num melhor aproveitamento da água armazenada no solo.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Disponível em: <[http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/abr\\_nacional.htm](http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/abr_nacional.htm)>. Acesso em: 01 mar. 2011.

BAMBERG, A. L. et al. Temporal changes of soil physical and hydraulic properties in strawberry fields. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 27, p. 385-394, 2011.

BARROS, L. C. **Captação de águas superficiais de chuvas em barraginhas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 16 p. (Circular Técnica, 2).

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, L. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 369-374, 1990.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extrível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

COSTA, J. M. N.; ANTUNES, F. Z.; SANTANA, D. P. Zoneamento agroclimático e planejamento agrícola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 14-17, jun. 1986.

DALMAGO, G. A. et al. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 855-864, 2009.

DENARDIN, J. E. et al. "Vertical mulching" como prática conservacionista para manejo de enxurrada em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 2847-2852, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Análise comparativa do meio físico e socioeconômico de três Municípios com parques florestais**: Araponga, Caparaó e São Roque de Minas - MG. Rio de Janeiro: CNPS, 2005. 42 p.

EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. G. de; SEDIYAMA, G. C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 445-452, 2002.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 513-524, 1999.

GARCIA, S. M. **Mulching vertical e manejo da água em sistema de plantio direto**. 2005. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GUIMARÃES, P. T. G. O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** Uberaba: IBRAFOS, 1992. p. 175-190.

LEÃO, T. P. et al. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 279-285, 2006.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under "cerrado" vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 4, p. 742-746, July/Aug. 1977.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária**. 2. ed. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1994. 62 p. (Boletim Técnico, 5).

McCULLEY et al. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. **Oecologia**, Berlin, v. 141, p. 620-628, 2004.

MOTA, J. C. A. et al. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 1, p. 1721-1731, 2010.

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 327-336, 2004.

PEREIRA, A. L.; MOREIRA, J. A. A.; KLAR, A. E. Efeitos de níveis de cobertura do solo sobre o manejo da irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.). **Irriga**, Botucatu, v. 7, p. 42-52, 2002.

RAGASSI, C. F. **Efeito da localização de nutrientes em profundidade para o crescimento radicular**: revisão bibliográfica. 2007. Disponível em: <[http://www.cafepoint.com.br/pdf/relatorio\\_nutrientes.pdf](http://www.cafepoint.com.br/pdf/relatorio_nutrientes.pdf)>. Acesso em: 07 jun. 2011.

RAIJ, B. van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: ANDA, 1988. 88 p.

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. 233 p.

SERAFIM, M. E. **Manejo do solo na melhoria de atributos físico-hídricos e químicos para a cultura do cafeeiro**. 2011. 119 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SOUZA, E. A. et al. Distribuição da umidade num Latossolo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial e enterrado, com uso de TDR. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro. **Anais...** Viçosa: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2003.

STONE, L. F. et al. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

**SEGUNDA PARTE - ARTIGOS**

**ARTIGO 1: Acurácia e calibração de sonda de capacitância em latossolo manejado com cafeeiros**

Bruno Montoani Silva <sup>(1)</sup>, Geraldo César de Oliveira <sup>(1)</sup>, Milson Evaldo Serafim <sup>(2)</sup>, João José da Silva Júnior <sup>(3)</sup>, Alberto Colombo <sup>(3)</sup> e José Maria de Lima <sup>(1)</sup>

Normas da Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB), submetido em 27/07/2011, aceito para publicação em 03/02/2012

---

(1) Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000 Lavras, MG. E-mail: montoani@posgrad.ufla.br, geraldooliveira@dcs.ufla.br, jmlima@dcs.ufla.br

(2) Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Campus Cáceres, Av. dos Ramires, s/n, Distrito Industrial - CEP 78.106-960, Cáceres, MT. E-mail: milson.serafim@cas.ifmt.edu.br

(3) Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000 Lavras, MG. E-mail: jjsjunior@posgrad.ufla.br, acolombo@deg.ufla.br

Resumo — Este trabalho teve como objetivo avaliar a acurácia da sonda de multisensores de capacitância Delta-T Profile probe PR2/6 utilizando as calibrações padrão de fábrica; realizar a calibração para condições específicas em locais com distintas condições de manejo do solo e, obter coeficientes de calibração que serão inseridos diretamente no instrumento, possibilitando medições acuradas em tempo real. Em janeiro de 2010 foram coletadas amostras com estrutura preservada em campo para análise em laboratório, utilizando o sensor ML2x Theta probe, obtendo-se leituras com o sensor e o conteúdo de água pelo método gravimétrico. Foi utilizado amostras de um Latossolo oriundo da região de São Roque de Minas – MG. Pode-se concluir que as calibrações padrões de fábrica mineral e orgânica não foram adequadas para nenhuma das condições de manejo avaliadas. Na impossibilidade de averiguar a acurácia obtida pelo método sugerido pelo fabricante, o uso de ajustes de regressão linear ou o aplicativo Solver mostraram-se úteis no processo de calibração. Foram necessárias apenas duas equações de calibração para as situações contrastantes de manejo avaliadas.

Termos para indexação: *Coffea arabica*, constante dielétrica do solo, determinação da umidade no solo, manejo do solo, sonda FDR, solos intemperizados.

### **Accuracy and calibration of capacitance probe in an oxisol managed with coffee**

Abstract — This study aimed to evaluate the accuracy of the Delta-T Profile Probe PR2 /6 multisensor capacitance probe using the factory default calibration equations, perform the calibration for specific conditions in locations with different soil management conditions and to obtain calibration coefficients that will be inserted directly into the instrument, enabling accurate measurements in real time. In January 2010 samples were collected with structure preserved in the field for laboratory analysis, using the sensor ML2x Theta probe, obtaining sensor outputs and water content by gravimetric method. We used samples of an Oxisol originated from the São Roque de Minas - MG. It can be concluded that the mineral and organic factory calibration standards were not suitable for handling any of the conditions evaluated. Unable to verify the accuracy obtained by the method suggested by the manufacturer, the use of linear

regression adjustments or the application solver proved to be useful features in the calibration process. It took only two calibration equations for situations contrasting management evaluated.

Index terms: *Coffea arabica*, soil dielectric constant, soil water content determination, soil management, FDR probe, weathered soils.

### **Introdução**

Conhecer o conteúdo de água no solo é fundamental para determinação do balanço hídrico local, do potencial de transporte de nutrientes para as plantas, da “produção” de água para mananciais hídricos, do momento mais adequado de preparo do solo e para o manejo da irrigação. O método padrão para determinação desse parâmetro é o método da estufa; a acurácia de qualquer outro método depende da proximidade do valor obtido em relação ao método padrão. A calibração é a metodologia mais aceita para se reduzir diferenças e qualquer diferença não removida pela calibração é devida à precisão do método ou do sensor (Evelt et al., 2006).

A partir de 1980, surgiram vários métodos baseados em respostas às propriedades eletromagnéticas do solo (EM), como alternativa à medição direta do conteúdo de água do solo ( $\Theta$ ) (Topp et al., 1980; Dean et al., 1987; Paltineanu & Starr, 1997). Esses métodos indiretos vêm

sendo difundidos, por apresentar vantagens como resposta rápida, medições não destrutivas, precisão aceitável (Stacheder et al., 2009), não emitir radiação ionizante e possibilitar várias medições simultâneas e armazenamento contínuo de dados por longos períodos, facilitando o monitoramento.

O princípio dos métodos EM é a emissão de um sinal elétrico e medição da resposta a esse sinal (geralmente o tempo de reflexão ou a frequência) que se dá em razão de mudanças na permissividade aparente ou constante dielétrica ( $\epsilon_a$ ) do solo (Evelt et al., 2006). A água é o componente com maior influência sobre a  $\epsilon_a$ , possuindo uma permissividade relativa muito maior ( $\epsilon_a = 81$ ) do que as partículas minerais e orgânicas do solo ( $\epsilon_a = 2 - 7$ ), e do ar ( $\epsilon_a = 1$ ), o que possibilita a estimativa de  $\theta$  pela medição da  $\epsilon_a$  (Topp et al., 1980).

A medição do conteúdo de água em camadas de solo mais profundas por meio de sensores Time Domain Reflectometry (TDR) ou por gravimetria requer uso de trincheiras e numerosas amostragens ou instalação de hastes metálicas o que dificulta e onera o monitoramento em áreas maiores (Veldkamp & O'Brien, 2000; Nijland et al., 2010). Desta forma, sondas com multisensores de capacitância (MCP) ou Frequence

Domain Reflectometry (FDR), por permitir medição em várias profundidades e locais em tempo real, vem sendo utilizadas no manejo da irrigação em diferentes culturas (Guerra et al., 2005), em estudos como comparação de métodos de preparo do solo (Starr & Paltineanu, 1998), em estudos de movimento de nutrientes (Oelmann et al., 2007), balanço hídrico em áreas cultivadas (Fares et al., 2006; Prevedello et al. 2007) e no monitoramento de umidade no perfil de solo em ecossistemas naturais e áreas de cultivo (Nijland et al., 2010). O princípio de funcionamento dos MCP se baseia na redução da frequência de ressonância à medida que o teor de água (permissividade) do meio aumenta (Evelt et al., 2006). Uma descrição detalhada do sistema e seu princípio de operação pode ser vista em Muñoz-Carpena et al. (2009).

Os sensores MCP e TDR apresentam equações de calibração padrão de fábrica que relacionam o conteúdo de água à leitura de saída do sensor. Entretanto, para medições mais acuradas, é necessário realizar calibrações para os diferentes solos, devido às propriedades eletromagnéticas inerentes a cada classe de solo (Fares et al., 2006; Prevedello et al., 2007). Calibrações têm sido realizadas em condições de campo (Polyakov et al., 2005; Prevedello et al., 2007; Silva et al., 2007) e

laboratório (Paltineanu & Starr, 1997; Baumhardt et al., 2000; Veldkamp & O'Brien, 2000; Fares et al., 2006; Lukano & Savage, 2006). A acurácia encontrada em modelos obtidos em condições de campo tem sido inferior àquela encontrada em laboratório (Paltineanu & Starr, 1997; Fares et al., 2006), o que é atribuído ao pequeno volume de solo abrangido na medição das sondas, as variações de densidade do solo e o próprio conteúdo de água junto ao tubo de acesso, além de efeitos de deformações ocorridas durante a instalação do tubo de acesso (Evetts et al., 2006).

Há um número limitado de ensaios de calibração em solos de clima tropical (Veldkamp & O'Brien, 2000; Polyakov et al., 2005; Fares et al., 2006), sendo este número ainda menor em solos do bioma Cerrado brasileiro (Sá et al., 2008). Em Latossolos argilosos, devido a algumas particularidades como os altos teores de óxidos e hidróxidos de ferro, Villwock (2004) afirma que a calibração específica é indispensável. Silva & Gervásio (1999) encontraram valores subestimados do conteúdo de água medidos por sonda TDR em um Latossolo muito argiloso, quando utilizaram a calibração padrão do fabricante.

Uma vez que a permissividade aparente é influenciada pelos teores de matéria orgânica e argila (Veldkamp & O'Brien, 2000; Kaiser et al.,

2010; Sá et al., 2008), óxidos e hidróxidos de ferro (Prevedello et al., 2007; Kaiser et al., 2010), condutividade elétrica e temperatura (Tomaselli & Bacchi, 2001; Evett et al., 2006) e densidade do solo (Malicki et al., 1996; Huang et al., 2004), salientando que esses atributos podem ser distintos no perfil do solo, Evett et al. (2006) propuseram que a calibração dos MCP seja separada por horizonte do solo.

Diante do exposto, objetivou-se: avaliar a acurácia da sonda de multisensores de capacitância Delta-T Profile probe PR2/6, utilizando as calibrações padrão de fábrica, por meio da sonda Theta probe ML2x; calibrar para condições específicas em locais com distintas condições de manejo do solo e, obter coeficientes de calibração que serão inseridos diretamente no instrumento, possibilitando medições acuradas em tempo real.

### **Material e Métodos**

O solo estudado foi um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso cultivado com cafeeiro, na região de São Roque de Minas, MG, que possui coordenadas aproximadas de 20°15' S e 46°22' WGr, a 900 m de altitude e classificação climática do tipo Cwa, segundo Köppen. O sistema de manejo adotado no cultivo do cafeeiro propicia alterações nos

atributos físico-químicos do solo, influenciando na retenção e conteúdo de água. Na fase de implantação do sistema, houve o revolvimento profundo na linha de plantio, deixando um sulco com 60 cm de profundidade e 50 cm de largura, com alterações na estrutura original do solo. Na entrelinha do cafeeiro foi implantada uma cobertura permanente de capim braquiária (*Urochloa* spp.), manejada com cortes periódicos. Após implantação do cafeeiro, com as plantas com altura superior a 50 cm, foi adicionado na linha de plantio  $7 \text{ kg m}^{-1}$  de gesso agrícola. Em seguida foi removida a camada superficial da entrelinha e amontoada na linha do cafeeiro. Desse modo, para se identificar diferenças nas camadas de solo devido a esse manejo, que provavelmente influenciaram a permissividade dielétrica aparente do meio, foram realizadas análises de densidade do solo, matéria orgânica, complexo sortivo para as camadas de 0-0,1 e 0,2-0,3 m (linha de plantio do cafeeiro - L), 0-0,1 e 0,1-0,2 m (entrelinha - E) e 0,75-0,85 m (horizonte Bw); além de ataque sulfúrico e análise granulométrica de amostras do solo objetivando sua caracterização (Tabelas 1 e 2).

Em janeiro de 2010, amostras com estrutura preservada foram coletadas com anéis cilíndricos de PVC rígido, com 10 cm de diâmetro e

10 cm de altura, em três repetições, para cada camada de solo descrita, com a finalidade obter uma quantidade de solo suficientemente representativa para inserção do sensor de umidade. O sensor de capacitância utilizado para medição do conteúdo de água (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK, modelo ML2x Theta probe) possui quatro hastes metálicas, que geram um sinal de 100 MHz, estendido ao interior do solo. Como saída, recebe um valor de voltagem (V) que é determinado por sua relação com a raiz quadrada da permissividade dielétrica aparente ( $\sqrt{\epsilon_a}$  ou Índice refrativo), por meio de uma equação polinomial intrínseca do sensor, denominada de resposta do sensor (equação 1) (Delta-T devices Ltd., 1999). A conversão do valor de saída do sensor em conteúdo de água do solo se dá por meio da relação existente entre o índice refrativo e o conteúdo de água do meio, denominada calibração do solo (equação 2). A equação calibração do solo varia de solo para solo, em função de suas particularidades, e pode ser expressa por uma equação linear, onde os coeficientes de ajuste  $a_0$  e  $a_1$  representam estas particularidades. Esses coeficientes podem ser inseridos no leitor de mão usado em campo, para medições mais acuradas em tempo real.

Há duas opções de calibrações do solo oriundas de fábrica: a calibração “mineral” ( $a_0 = 1,6$  e  $a_1 = 8,4$ ), indicada para solos com teor de matéria orgânica inferiores a 7% e  $D_s > 1,0 \text{ g dm}^{-3}$  e a calibração “orgânica” ( $a_0 = 1,3$  e  $a_1 = 7,7$ ), indicada para teores de matéria orgânica maiores que 7% e  $D_s < 1,0 \text{ g dm}^{-3}$ . O sensor ML2x tem acurácia de  $\pm 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (0-70°C), utilizando calibrações de fábrica, e  $\pm 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , quando se emprega calibração específica para o solo a se trabalhar, e sem erros significativos para solos de 250 a 2000  $\text{mS m}^{-1}$  de condutividade elétrica. A diferença no processo de obtenção do conteúdo de água da sonda ML2x para a sonda de multisensores de capacitância PR2/6 (Delta-T devices Ltd., UK, modelo PR2/6 Profile probe) é a equação de resposta (equação 3). Assim, ao fazer leituras com essas sondas, o valor de saída do sensor (V) é diferente, mas quando este valor é inserido na equação de resposta da respectiva sonda (equações 1 e 3), é esperado um mesmo valor de  $\sqrt{\square}$ . Com base nisso, obtendo-se valores de  $\sqrt{\square}$  e conteúdo de água do solo ( $\theta$ ), podem-se obter os coeficientes de calibração  $a_0$  e  $a_1$  empregando a sonda ML2x, e usá-los para a PR2/6, conforme manual do fabricante (Delta-T devices Ltd., 2001), dessa forma o enfoque deste estudo é a PR2/6, mas a obtenção dos dados feita será por meio da ML2x.

$$\sqrt{\varepsilon} = 1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3 \quad (1)$$

$$\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1 \times \theta \quad (2)$$

$$\sqrt{\varepsilon} = 1,125 - 5,53V + 67,17V^2 - 234,42V^3 + 413,56V^4 - 356,68V^5 + 121,53V^6 \quad (3)$$

onde V representa a leitura de saída do sensor, em volts;  $\sqrt{\varepsilon}$  é a raiz quadrada da permissividade dielétrica;  $\theta$  representa o conteúdo de água volumétrico, em  $m^3 m^{-3}$ ; e a0 e a1 são os parâmetros de calibração, específicos para um determinado solo.

Determinou-se o peso inicial (Pi) das amostras e, na sequência, foram colocadas em estufa a 60°C, até atingirem  $\theta$  entre 25 a 30%. Em seguida, a sonda ML2x foi inserida em cada amostra, obtendo-se a leitura de saída. Novamente, as amostras foram secas em estufa a 60°C, até terem  $\theta$  próximo de 15%, e outra leitura com o ML2x foi efetuada. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105°C, e assim obteve-se o peso seco das mesmas. Ao final, dois pares de valores (saída do sensor, e  $\theta$ ) foram obtidos, conforme sugerido no manual do fabricante (Delta-T devices Ltd., 2001). Para estimar o peso com que as amostras estariam com os  $\theta$  próximo do valor desejado (entre 25 e 30%, e 15%), uma repetição extra foi realizada, para se conhecer o peso seco e a

densidade do solo, e assim possibilitar estimar o peso úmido desejado para as demais amostras, conforme as etapas a seguir: 1) obter o peso inicial e o peso seco (estufa a 105°C); 2) calcular o conteúdo de água inicial ( $\Theta$ ), a densidade do solo ( $D_s = \text{peso seco/volume}$ ), e a umidade gravimétrica ( $U, \text{ g g}^{-1}$ ) pela relação  $\Theta = U \cdot D_s / D_a$  ( $D_a = \text{densidade da água}$ ); 3) Estimar o peso seco de cada amostra, pela relação  $P_u = P_s(1+U)$ , sendo os pesos iniciais mensurados e considerados como  $P_u$ ; 4) Estimar o peso úmido na umidade desejada ( $\Theta$ ), pela umidade atual ( $U$ ) e peso seco estimado no item anterior, por meio da relação  $P_u = P_s(1+U)$ .

A acurácia das calibrações de fábrica foi avaliada pela raiz do erro médio quadrático (RMSE) e pela reta 1:1 entre os valores observados ( $\theta$  obtido por gravimetria) e os valores estimados ( $\theta$  obtido pelas calibrações do solo padrões de fábrica usando a equação de resposta da ML2/6).

Em seguida, procedeu-se a calibração para cada camada de solo, por três processos. No primeiro, com os dois pares de valores  $\theta$  e  $\sqrt{\square}$  (obtidos pela equação de resposta da ML2x) para  $\theta$  próximos a 25 e 15%, montou-se um sistema de equações com a equação de calibração (equação 2), obtendo-se os coeficientes  $a_0$  e  $a_1$ , conforme sugerido pelo fabricante

(Delta-T devices Ltd., 2001). Como o processo não prevê uso de repetições, gerando incertezas sobre os coeficientes obtidos, já que foram observadas variações entre amostras de mesmo solo, modelos lineares foram ajustados entre a  $\sqrt{\square}$  e  $\theta$  (obtida por gravimetria) para toda a série de dados e para cada camada de solo. Além das regressões lineares, foi calculado o quadrado da soma dos desvios e realizado sua minimização pela ferramenta Solver do Excel<sup>®</sup>, para os valores observados e estimados, obtendo-se os coeficientes lineares e angulares.

A acurácia dos modelos de calibração foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), pela RMSE, e pela reta 1:1 entre os valores observados e estimados. A validação do modelo foi realizada pelo índice de concordância (d) de Willmott (1981), e pelo índice de confiança (c) de Camargo & Sentelhas (1997). Para os indicadores  $R^2$ , d e c (0 a 1) quanto mais próximo de 1, melhor ajuste dos modelos e, para RMSE, valores próximos de zero são desejados. Para definição das equações de calibração a ser utilizadas, foi construído o intervalo de confiança (IC) e o erro padrão para o coeficiente angular e o intercepto das retas ajustadas, permitindo assim verificar semelhanças e diferenças entre os modelos por

camada e também para a toda a série de dados, escolhendo-se apenas aquelas diferentes.

### **Resultados e Discussão**

O conteúdo de água medido pela sonda de capacitância, utilizando a calibração “mineral”, para todos os locais avaliados, foi subestimado em relação ao método padrão da estufa, uma vez que os valores foram subestimados em toda a faixa de umidade estudada, como indica a posição da reta ajustada entre os valores observados e valores medidos na calibração mineral, sempre abaixo da reta 1:1 (Figura 1a). Este resultado é devido aos altos teores de óxidos de ferro e elevado grau de intemperização do solo estudado (Tabelas 1 e 2) que afetam a constante dielétrica e, por consequência, a umidade estimada (Villwock, 2004; Santos et al., 2010), dada a presença elevada de cargas positivas nesse solo. Vários autores encontraram valores subestimados para o conteúdo de água do solo, quando comparados com a equação de Topp et al. (1980), que relaciona o conteúdo de água à constante dielétrica, tida como equação padrão em equipamentos TDR (Silva & Gervásio, 1999; Santos et al., 2010). Isso indica que as calibrações de fábrica das MCP também não atendem ao propósito da universalização, assim como a equação de

Topp et al. (1980) em sondas TDR, já muito discutido na literatura (Tommaselli & Bacchi, 2001), o que se deve a particularidades dos solos tropicais, principalmente Latossolos e a necessidade de calibração específica para estes solos.

Para a calibração “orgânica” também de fábrica, o conteúdo de água observado foi subestimado a partir de valores próximos de 0,10 a 0,15  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e superestimado para valores de umidade menores, para todas as camadas avaliadas (Figura 1b). O manual do fabricante informa que a calibração orgânica é indicada para solos com teores de matéria orgânica superiores a 7% e  $D_s < 1,0 \text{ g dm}^{-3}$ , mas não faz referência à textura e mineralogia em que a calibração é adequada. Entretanto, mesmo de posse dessas informações (Tabelas 1 e 2), tendo em vista o comportamento semelhante das equações para cada camada de solo, não foi possível isolar os fatores que condicionaram o comportamento acima descrito.

Kaiser et al. (2010), estudando materiais de Latossolo Vermelho distrófico com 549  $\text{dag kg}^{-1}$  de argila e  $k_i$  de 2,12, encontraram que o modelo de Topp et al. (1980) subestimou a umidade observada para os menores valores de umidade e superestimou a umidade para os maiores valores e atribuíram este comportamento ao alto grau de intemperismo e

teores elevados de óxido de ferro. Desta forma, considerando que o solo deste estudo é ainda mais intemperizado ( $k_i$  de 0,49) e possui teores consideráveis de  $Fe_2O_3$  (Tabela 1), espera-se comportamento ainda mais diferenciado em relação ao Latossolo estudado por Kaiser et al. (2010).

Comparativamente, a calibração mineral possui maior erro, ou menos acurácia, na determinação da umidade do que a orgânica (Tabela 3), sendo as maiores diferenças observadas nas camadas Bw (0,75-0,85 m) e L (0-0,10 m). Também pelo RMSE, verifica-se que, em média, os desvios são maiores na calibração mineral do que na orgânica, e que somente na camada Bw (0,75-0,85 m) foram verificados valores acima do erro tolerado ( $\pm 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) pelo manual do fabricante, utilizando as calibrações de fábrica. Salienta-se, entretanto, que esses valores de RMSE tolerados não excluem a necessidade de calibração específica para cada camada de solo, pois há desvios consideráveis em relação a reta 1:1 para ambas calibrações de fábrica (Figura 1).

Todas as camadas do solo avaliado (Tabela 2) apresentaram teores de matéria orgânica inferiores a 7% e  $D_s < 1,0 \text{ g dm}^{-3}$ , não se adequando, portanto, a nenhuma das duas calibrações de fábrica. Diante disso, e

considerando os desvios em relação à umidade observada (Figura 1), recomenda-se calibração específica para cada camada de solo.

Na metodologia descrita pelo fabricante não há previsão de uso de repetições para obtenção dos coeficientes de calibração. Como nesse estudo foram feitas três repetições de cada camada avaliada, foram obtidos diferentes coeficientes para a mesma situação (Tabela 4). Pela observação das médias, há diferenças entre os coeficientes obtidos em cada camada, o que pode ser melhor observado pela análise dos coeficientes obtidos pelas metodologias de regressão e minimização dos erros (Solver).

Todos os ajustes lineares entre o conteúdo de água observado e a raiz quadrada da constante dielétrica (Índice refrativo) foram significativos ( $p < 0,01$ ), em todas as camadas de solo, e também para o ajuste envolvendo toda a série de dados das camadas (Figura 1c). Outros modelos de ajuste que relacionam a constante dielétrica ao conteúdo de água, como o polinomial e o potencial, podem resultar em maiores coeficientes de determinação como na maioria dos trabalhos (Coelho et al., 2001; Tommaselli & Bacchi, 2001; Kaiser et al., 2010), entretanto há uma vantagem importante em se utilizar os modelos lineares como

calibração do solo para MCP Profile probe PR2, que é a medição em tempo real da umidade no campo. Isso é possível porque há uma opção no leitor do equipamento que permite inserir os coeficientes de reta  $a_0$  e  $a_1$  (ajuste linear), eliminando a necessidade de corrigir as leituras obtidas no campo. A possibilidade do uso de equações lineares para calibração de solos com altos teores de argila, a exemplo do Latossolo em estudo, foi definida por Santos et al., (2010) que, estudando solos com teores crescentes de argila, observaram tendência de linearização da equação de calibração na medida em que se elevavam os teores desta fração no solo.

Os coeficientes de calibração obtidos pelo Solver e também os obtidos por ajuste de regressão linear, juntamente com os indicadores de acurácia ( $R^2$ , RMSE), além da validação das equações de ajuste (índices d e c) para cada camada são apresentados na Tabela 5.

Em todas as avaliações para todas as camadas e localização da amostragem, independentemente do método de obtenção dos coeficientes, foram encontrados altos índices de Wilmott ( $>0,99$ ), confiança ( $>0,95$ ) e determinação ( $>0,96$ ). O maior valor de RMSE encontrado foi de  $0,011 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para a camada Bw (0,75-0,85 m). Esses índices sugerem confiabilidade da acurácia dos modelos para todas as condições

estudadas. Os modelos que utilizam toda a série de dados apresentaram menores valores para os índices de acurácia em relação aos modelos individuais por camada, destacando o índice de confiança (0,906) e o RMSE (0,018).

Comparando as duas metodologias (Tabela 5), observam-se diferenças nos valores dos coeficientes de ajuste por camada avaliada, destacando o ajuste envolvendo toda a série de dados ( $a_0 = 1,618$  e  $a_1 = 4,808$  pela regressão linear, e  $a_0 = 1,532$  e  $a_1 = 5,200$  pelo Solver). Porém essas diferenças não resultaram em  $R^2$ , d, c e RMSE diferentes entre as duas metodologias.

Concordando com os indicadores de validação das equações de calibração obtidas, por regressão linear e Solver, o ajuste entre os valores estimados após a calibração e os valores observados de conteúdo de água mostra grande coincidência com a reta 1:1 (Figura 2). Desta forma, os procedimentos de calibração adotados apresentaram ganhos importantes de acurácia na medição correta do conteúdo de água, visualizados pela diminuição do RMSE calculado antes (Tabela 3) e após (Tabela 5) do processo, justificando sua condução. Estes resultados mostram que ambos

procedimentos podem ser adotados para a calibração específica da sonda de MCP.

Analisando o intervalo de confiança e o erro padrão dos coeficientes para cada camada de solo e a série toda (Figura 3), obtidos pela regressão linear, verifica-se a similaridade entre os ajustes para as camadas L (0,2-0,3 m), Bw (0,75-0,85 m), E (0-0,1 m), E (0,1-0,2 m) e a série toda, sugerindo que qualquer uma das equações ajustadas para essas camadas pode representar as demais. Ou seja, não se faz necessário realizar calibração específica para cada uma dessas situações, podendo ser utilizada apenas uma equação para todas essas situações. O mesmo não foi observado para L (0-0,1 m), pois não houve coincidência do intervalo de confiança do coeficiente angular dessa camada e as demais, indicando que os coeficientes são diferentes. Quanto ao intercepto, há diferença para a camada L (0,2-0,3 m) e a série toda.

A exigência de calibração específica para L (0-0,1 m) pode ser atribuída ao alto teor de matéria orgânica em relação aos demais locais, excetuando-se a E (0-0,1 m), que possui mesmo teor de matéria orgânica, porém maior densidade do solo (Tabela 2).

Um maior teor de matéria orgânica, para um mesmo conteúdo de água do solo, resulta em menos poros preenchidos por água livre, uma vez que água estaria adsorvida à matéria orgânica. Como a água adsorvida possui menor constante dielétrica aparente, a constante dielétrica é menor, para um mesmo conteúdo de água. Esse efeito provavelmente é similar ao que ocorre nas argilas 2:1, quando comparado às argilas 1:1, como descrito por Polyakov et al. (2005), o que foi atribuído à maior superfície específica das argilas 2:1.

Comparando-se as camadas do solo estudado, infere-se que a maior densidade do solo associou-se a uma menor quantidade de macroporos, diminuindo o espaço preenchido por ar. Desse modo para um mesmo conteúdo de água, há maior relação água-ar na condição de maior densidade, e como a constante dielétrica do ar é próxima de 1 e a da água pode chegar a 80, haveria assim elevação da constante dielétrica aparente do meio.

### **Conclusões**

1. As calibrações padrões mineral e orgânica informadas pelo fabricante não foram adequadas para nenhuma das condições de

manejo avaliadas.

2. Na impossibilidade de averiguar a acurácia obtida pelo método sugerido pelo fabricante, o uso de ajustes de regressão linear ou o aplicativo Solver mostraram-se recursos úteis no processo de calibração.
3. Foram necessárias apenas duas equações de calibração para as situações contrastantes de manejo avaliadas.
4. O manejo do solo afetou a estimativa da umidade do solo pela alteração na densidade do solo e do teor de matéria orgânica do solo.

### **Agradecimentos**

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento, pela concessão de bolsa aos autores. A empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais e à Empresa Agropecuária Piumhi pelo apoio.

### **Referências**

BAUMHARDT, R.L.; LASCANO, R.J; EVETT, S.R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p.1940–1946, 2000.

CAMARGO, A.P. DE; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

COELHO, E.F.; ANDRADE, C.L.T.; OR, D.; LOPES, L.C.; SOUZA, C.F. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.81-87, 2001.

DEAN, T.J.; BELL, J.P.; BATY, A.J.B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. 1. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, v. 93, p. 67–78, 1987.

DELTA-T DEVICES LTD., “**User Manual for the Profile Probe type PR2**”, v.1.2, Cambridge, England, 2001.

DELTA-T DEVICES LTD.; “**ThetaProbe Soil Moisture Sensor. Type ML2x. User Manual**”, Cambridge, England, 1999.

EVETT, S.R.; TOLK, J.A.; HOWELL, T.A. Soil Profile Water Content Determination: Sensor Accuracy, Axial Response, Calibration, Temperature Dependence, and Precision. **Vadose Zone Journal**, v. 5, n. 3, p. 894-907, 2006.

FARES, A.; HAMDHANI, H.; POLYAKOV, V.; DOGAN, A.; VALENZUELA, H. Real-Time Soil Water Monitoring for Optimum Water Management. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 6, p. 1527-1535, 2006.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C.; SAMPAIO, J.B.R.; SILVA, H.C.; ARAÚJO, M.C. de. **Irrigação do cafeeiro no cerrado: estratégia de manejo de água para uniformização de florada**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 4 p. (Embrapa Cerrados. Comunicado Técnico, 122).

HUANG, Q.; AKINREMI, O.; RAJAN, R.S.; BULLOCK, P. Laboratory and field evaluation of five soil water sensors. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 84, p. 431– 438, 2004.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 649-658, 2010.

LUKANU, G.; SAVAGE, M.J. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil. **Water SA**, v. 32, n. 1, p. 37-42, 2006.

MALICKI, M.A.; PLAGGE, R.; ROTH, C.H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **European Journal of Soil Sciences**, v. 47, p. 357-366, 1996.

MUÑOZ-CARPENA, R. **Field Devices for Monitoring Soil Water Content**. Bulletin 343, University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, EDIS, January 2009.

NIJLAND, W., MEIJDE, M. VAN DER, ADDINK, E. A, & JONG, S. M. DE. Detection of soil moisture and vegetation water abstraction in a Mediterranean natural area using electrical resistivity tomography. **Catena**, v. 81, n. 3, p. 209-216, 2010.

OELMANN, Y.; KREUTZIGER, Y.; TEMPERTON, V.M.; BUCHMANN, N.; ROSCHER, C.; SCHUMACHER, J.; SCHULZE, E.D.; WEISSER, W.W.; WILCKE, W. Nitrogen and phosphorus budgets in experimental grasslands of variable diversity. **Journal of Environmental Quality**, v. 36, n. 2, 396-407, 2007.

PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1576- 1585, 1997.

POLYAKOV, V; FARES, A; RYDER, M.H. Calibration of a Capacitance System for Measuring Water Content of Tropical Soil.

**Vadose Zone Journal**, v. 4 (Special Section: Soil Water Sensing), p. 1004-1010, 2005.

PREVEDELLO, C.L.; MAGGIOTTO, S.R.; LOYOLA, J.M.T.; DIAS, N.L.; BEPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 1-8, 2007.

SÁ, M.A.C. de; SANTOS JUNIOR, J.D.G. dos; SANO, E.E. **Calibração e Validação de Sensor Dielétrico para Estimativa de Teor de Água em Solos do Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 32 p. (Embrapa Cerrados. Comunicado Técnico, 223).

SANTOS, M.R.D.; ZONTA, J.H.; MARTINEZ, M.A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34, 299-307, 2010.

SILVA, C.R.D.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.D.; ALVES JÚNIOR, J. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 6, p. 636-640, 2007.

SILVA, E.L.; GERVÁSIO, E.S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.417-420, 1999.

STACHEDER, M.; KOENIGER, F.; SCHUHMANN, R. New Dielectric Sensors and Sensing Techniques for Soil and Snow Moisture Measurements. **Sensors**, v. 9, p. 2951-2967, 2009.

STARR, J.L.; PALTINEANU, I.C. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. **Soil & Tillage Research**, v. 47, p. 43-49, 1998.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 1145-1154, 2001.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, n.3, p. 574–582, 1980.

VELDKAMP, E.; OBRIEN, J. J. Calibration of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Humid Tropical Soils of Volcanic Origin. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, p. 1549-1553, 2000.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F. & VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, v. 9, p. 82-88, 2004.

WILLMOTT, C. J., On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

**Tabela 1.** Granulometria e resultados do ataque sulfúrico de amostras de horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais do Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

Horiz.	Prof. (m)	Areia	Silte	Argila	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>3</sub>	Ki	Kr
------(g kg <sup>-1</sup> )-----										
A	0-0,2	50	180	770	102	355	157	13,2	0,49	0,38
Bw	0,6-0,8	40	160	790	105	392	169	12,7	0,46	0,36

**Tabela 2.** Análises química e física em camadas do solo avaliado (L= Linha de cultivo; E= entrelinha; Bw=horizonte B).

Pos.	Camada (m)	pH (H <sub>2</sub> O)	SB	H+Al ------(cmolc dm <sup>-3</sup> )-----	t	T	V	m	CE (mS m <sup>-1</sup> )	MO (dag/kg)	Ds (kg.dm <sup>-3</sup> )	VTP (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )
L	0 – 0,1	5,6	5,3	4,0	5,4	9,3	56,5	1,9	60	4,1	0,86	0,68
	0,2 – 0,3	6,0	6,2	3,2	6,2	9,4	65,7	0,0	80	3,4	0,85	0,68
EL	0 – 0,1	5,4	3,5	5,6	3,7	9,1	38,1	5,5	31	4,0	0,95	0,64
	0,1 – 0,2	4,6	0,9	8,8	1,7	9,7	9,4	46,8	24	3,1	0,91	0,66
Bw	0,75 – 0,85	5,3	1,4	4,0	1,5	5,5	26,0	6,6	16	1,6	0,65	0,65

\*Pos. = Posição de amostragem, linha de plantio (L) e entrelinha (E). pH = potencial hidrogenionico. SB = soma de bases. H+Al = acidez potencial. t = capacidade de troca de cátions efetiva. T = capacidade de troca de cátions potencial. V = saturação por bases. m = saturação por alumínio. CE = condutividade elétrica. MO = matéria orgânica do solo. Ds = densidade do solo. VTP = volume total de poros

**Tabela 3.** Acurácia das calibrações padrão de fábrica (mineral e orgânica)

Camada de solo	Gravimétrica* (observado)	Mineral		Orgânica	
		Erro <sup>*2</sup>	RMSE <sup>*3</sup>	Erro <sup>*2</sup>	RMSE <sup>*3</sup>
0-0,10 m, Linha	0,230	0,128	0,104	0,066	0,048
0,20-0,30 m, Linha	0,273	0,111	0,096	0,055	0,041
0-0,10 m, Entrelinha	0,300	0,110	0,094	0,059	0,043
0,10-0,20 m, Entrelinha	0,302	0,120	0,102	0,068	0,050
0,75-0,85 m, Horizonte Bw	0,287	0,134	0,117	0,077	0,060

\*Valores médios de umidade volumétrica para o ponto mais úmido de umidade avaliado. <sup>\*2</sup>Diferença dos valores observados para os determinados pelas equações de fábrica <sup>\*3</sup>Raiz do erro médio quadrático para toda a série de dados obtida pelas calibrações de fábrica em relação aos valores observados.

**Tabela 4.** Coeficientes de calibração do solo a0 e a1 para cada camada de solo pelo processo sugerido no manual do fabricante

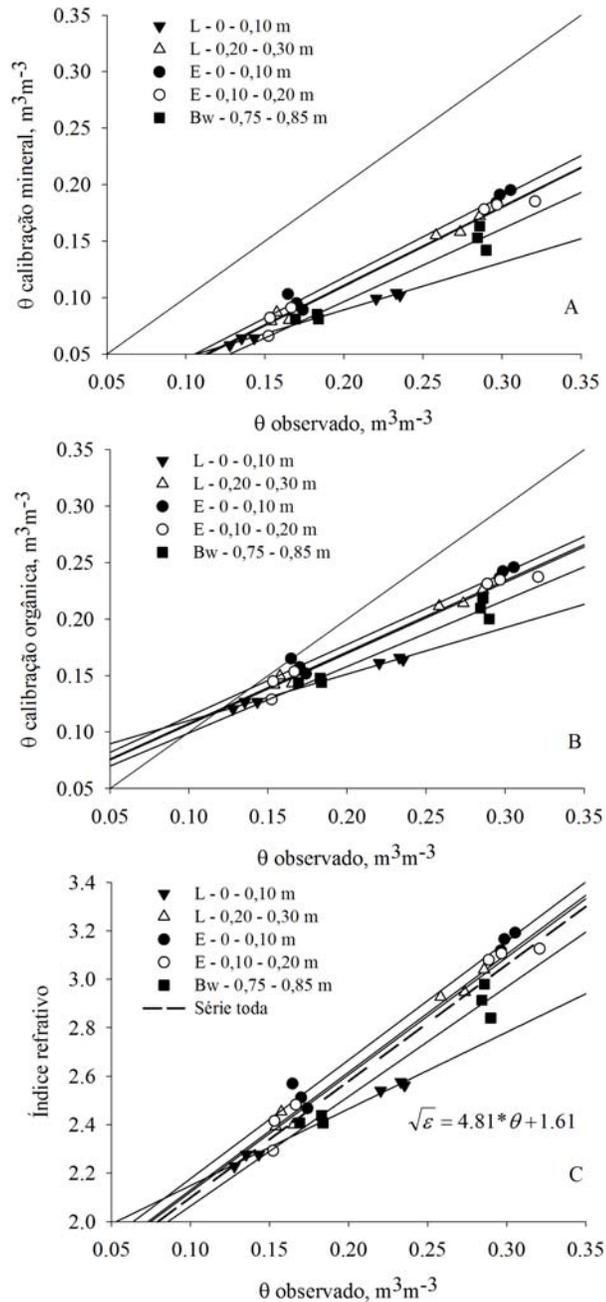
Camada de solo	0-0,10m		0,20-0,30 m		0-0,10 m		0,10-0,20 m		0,75-0,85 m	
	Linha		Linha		Entrelinha		Entrelinha		Horizonte Bw	
	a0*	a1* <sup>1</sup>	a0	a1	a0	a1	a0	a1	a0	a1
Repetições										
1	1,860	3,072	1,603	5,129	1,837	4,450	1,412	5,777	1,375	5,617
2	1,797	3,375	1,522	5,313	1,693	4,811	1,786	4,175	1,664	4,397
3	1,831	3,106	1,780	4,268	1,508	5,517	1,677	4,816	1,749	3,765
Média	1,829	3,184	1,635	4,903	1,679	4,926	1,625	4,923	1,596	4,593

\*a0 = coeficiente linear ou intercepto, \*<sup>1</sup>a1 = coeficiente angular

**Tabela 5.** Acurácia e validação dos modelos de calibração do solo

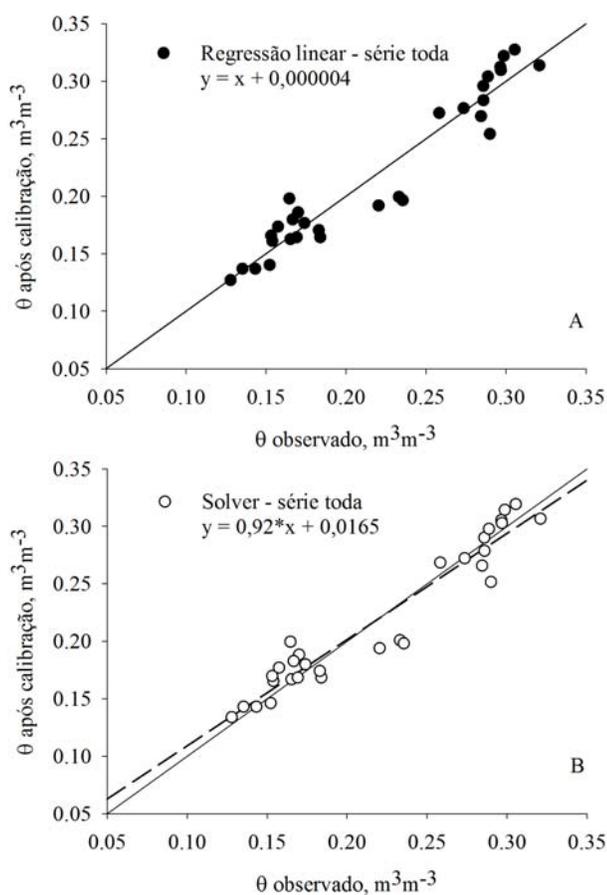
Camada de solo	Coeficientes eq. Calibração		R <sup>2</sup>	RMSE	d	C
	a0 (linear)	a1 (angular)				
	Regressão linear					
Série toda	1,618	4,808	0,925	0,018	0,980	0,906
0-0,10 m linha	1,831	3,169	0,994	0,004	0,999	0,993
0,20-0,30 m linha	1,644	4,865	0,988	0,006	0,997	0,985
0-0,10 m entrelinha	1,687	4,901	0,981	0,009	0,995	0,977
0,10-0,20 m entrelinha	1,637	4,847	0,978	0,011	0,994	0,973
0,75-0,85 m horizonte Bw	1,612	4,524	0,960	0,011	0,990	0,950
	Solver (minimização do MSE)					
Série toda	1,532	5,200	0,925	0,017	0,980	0,906
0-0,10 m linha	1,828	3,188	0,994	0,004	0,999	0,993
0,20-0,30 m linha	1,631	4,923	0,988	0,006	0,997	0,985
0-0,10 m entrelinha	1,665	4,994	0,981	0,009	0,995	0,977
0,10-0,20 m entrelinha	1,612	4,955	0,978	0,011	0,994	0,973
0,75-0,85 m horizonte Bw	1,568	4,713	0,960	0,011	0,990	0,950

RMSE: Raiz do erro médio quadrático entre os valores observados e estimados pelas equações de calibração do solo para cada situação de manejo e para toda a série de dados. d: Índice de Willmott. C: Índice de confiança.

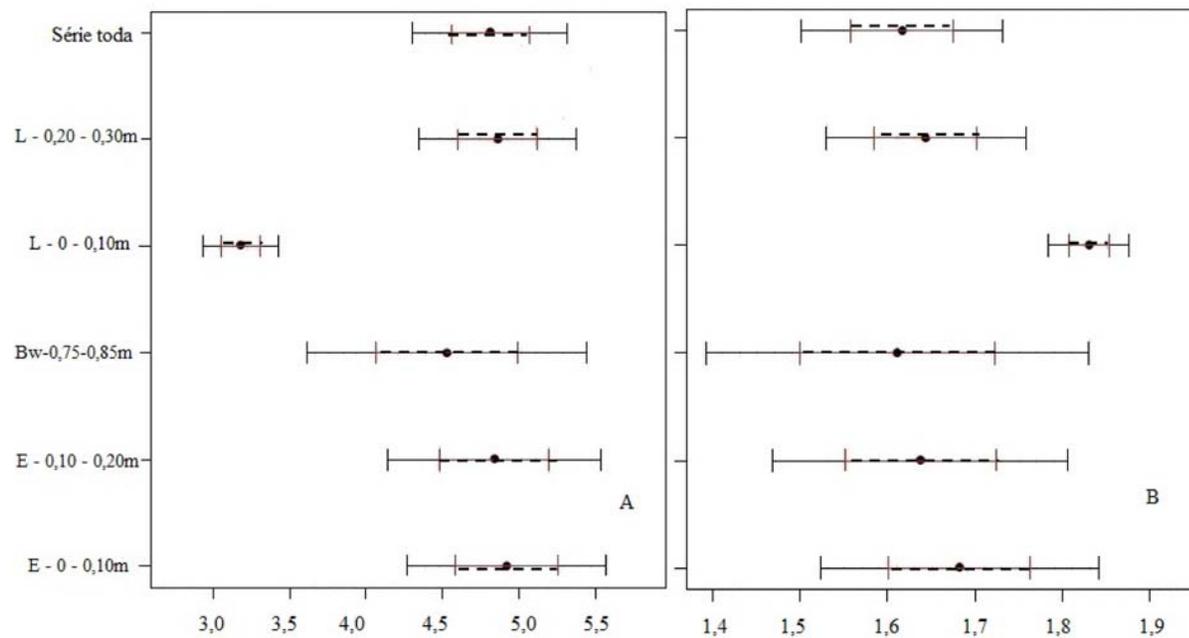


**Figura 1.** Relação entre o conteúdo de água determinado por gravimetria (método padrão) e o mensurado com sonda utilizando A, calibração de

fábrica “mineral”; B, calibração de fábrica “orgânica”; C, Ajuste de modelo de regressão linear entre o índice refrativo ( $\sqrt{\epsilon}$ ) e o conteúdo de água do solo.



**Figura 2.** Retas 1:1 entre o conteúdo de água volumétrico observado (estufa) e o estimado pelas calibrações ajustadas para toda a série de dados. A, Regressão linear (série toda); B, Solver (série toda).



**Figura 3.** Intervalo de confiança de 95% (faixa contínua) e erro padrão (faixa pontilhada) para o coeficiente angular e o intercepto das equações de calibração obtidas por regressão linear. A, intervalo de confiança (95%) e erro padrão para o coeficiente angular; B, intervalo de confiança (95%) e erro padrão para o intercepto.

## **ARTIGO 2. AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO PERFIL DO SOLO <sup>(1)</sup>**

Normas da Revista Geoderma

Bruno Montoani Silva <sup>(2)</sup>; Walbert Junior Reis dos Santos <sup>(2)</sup>; Geraldo César de Oliveira <sup>(3)</sup>; Nilton Curi <sup>(4)</sup>; João José Marques <sup>(3)</sup>; Marcelo Silva de Oliveira <sup>(5)</sup>; Paulo Tácito Gontijo Guimarães <sup>(6)</sup>

---

<sup>(1)</sup>Parte da dissertação do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras (MG).

<sup>(2)</sup>Mestrando, Departamento de Ciência do Solo – UFLA (DCS/UFLA). Bolsista do CNPq. E-mail: montoani@gmail.com

<sup>(3)</sup>Professores Associados do DCS/UFLA. Bolsistas do CNPq. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br; jjmarques@dcs.ufla.br

<sup>(4)</sup>Professor Titular do DCS/UFLA. Bolsista do CNPq. E-mail: nilteuri@dcs.ufla.br

<sup>(5)</sup>Professor Associado do Departamento de Ciências Exatas – UFLA (DEX/UFLA). Email: marcelo.oliveira@dex.ufla.br

<sup>(6)</sup>Pesquisador da EPAMIG, Centro Tecnológico do Sul de Minas, Lavras-MG. E-mail: paulotgg@dcs.ufla.br

## AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO PERFIL DO SOLO

**Resumo** - O conhecimento do conteúdo de água no perfil do solo é essencial para o manejo eficiente da cafeicultura. O objetivo deste trabalho foi utilizar técnicas de geoestatística no estudo espaço-temporal da água em um Latossolo Vermelho distrófico típico. Os dados foram coletados em área cafeeira localizada em São Roque de Minas, Região Fisiográfica Alto São Francisco-MG. Os dados de conteúdo de água no solo foram obtidos por meio de uma sonda dotada de multi-sensores de capacitância (MCP) nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm, no período de 07/03/2010 a 07/12/2010. Após o ajuste do semivariograma, interpolaram-se os valores por meio de krigagem gerando uma superfície contínua de profundidade x tempo (SCPT) e superfície de disponibilidade de água para a planta (SDAP). As superfícies geradas permitiram a avaliação da dinâmica da água no solo e sua disponibilidade para a planta, mostrando os efeitos do clima na variação do conteúdo de água e também, principalmente, dos períodos e camadas onde houve maior consumo hídrico pela planta e zonas no solo onde há água disponível no solo potencialmente explorável pelo sistema radicular.

Termos de indexação: Conteúdo de água no solo, variação espaço-temporal, manejo do solo, eficiência de uso da água do solo

## SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF SOIL WATER CONTENT IN SOIL PROFILE

**Summary** - The knowledge of water content in the soil profile is essential for the efficient management of coffee growing. The aim of this work was to use geostatistical techniques to study spatio-temporal behavior of water in a Red

Latosol. Data were collected in the coffee area in São Roque de Minas, physiographic region Upper São Francisco, MG. The data of soil water content were obtained using a probe provided with multi-sensor capacitance (MCP) at depths of 10, 20, 30, 40, 60 and 100 cm in the period from 07/03/2010 and 07/12/2010. After adjusting the semivariogram, the values were interpolated by kriging generating a continuous surface of depth x time (SCPT) and surface water availability to the plant (SDAP). The surfaces generated allowed the identification of the dynamics of soil water content and its availability to the plant, showing the effects of climate change in water content and, particularly, periods and layers where there was higher water utilization by plant and soil layers where there is available water in the soil potentially exploitable by the root system.

Index terms: soil water content, spatio-temporal pattern, soil management, arabica coffee, soil water use efficiency

## INTRODUÇÃO

Os solos têm capacidade de armazenar e disponibilizar água devido aos mecanismos de adsorção e capilaridade, função expressa pela estrutura e presença de cargas elétricas, que são alteráveis em função do manejo adotado (Ferreira, 1999; Oliveira, 2004; Tormena et al., 1999; Silva et al., 2011c; Mazurana et al., 2011; Veiga et al., 2010; Leão et al., 2006; Bamber et al., 2011). Por outro lado o conteúdo de água armazenado é resultado dos processos hidrológicos de precipitação pluvial e ou irrigação, ascensão capilar, drenagem, deflúvio e evapotranspiração (Silva et al., 2001; Mota et al., 2010), variando temporalmente, e ao longo do perfil do solo.

Técnicas geoestatísticas têm sido utilizadas para estudar a distribuição espacial da umidade no solo (Western et al., 2004). Entretanto, nesse e em outros trabalhos como os de Grego et al. (2006); Herbst et al. (2003); Hu et al. (2010); Reichert et al. (2008); Reichardt et al. (2001) Vinnikov et al. (1996); Zanette et al. (2007) e Mello et al. (2011), quando os autores incluem a variação temporal da umidade nos trabalhos de variabilidade espacial, geralmente são confeccionados uma superfície/mapa de variabilidade espacial para cada data amostrada. Contudo devido a alta variabilidade temporal e espacial intrínseca da umidade tanto em área, como também no perfil do solo, há uma redução no poder de análise quando feita em vários mapas, pois não é contemplada a variação espaço-temporal simultaneamente. Todavia, na geoestatística, não há restrições teóricas para se trabalhar espaço e tempo concomitantemente. Isso não vem sendo realizado, possivelmente, devido à dificuldade de interpretação dos parâmetros gerados pela geoestatística, função da complexidade da unidade de medida de distância gerada, pois integra tempo e espaço.

No intuito de elucidar o comportamento do conteúdo de água armazenado no solo no decorrer do tempo e em profundidade, é proposta a aplicação de técnicas de geoestatística para criar uma superfície contínua profundidade x tempo (SCPT), que possibilita identificar profundidades e períodos de menor e maior quantidade de água no solo. Dessa forma, a possibilidade de inferências sobre situações de déficit hídrico para a cultura; recarga de água no solo; zonas do solo de maior consumo hídrico pela planta, e definição de existência de água em profundidade e efetividade de uso desta água pelas plantas, principalmente nas épocas do ano de menor pluviosidade, se torna mais real.

Na região do Cerrado brasileiro, os solos apresentam limitações químicas ao desenvolvimento das raízes em profundidade (Raij, 1988; Guimarães, 1992), tornando as lavouras sujeitas a déficits hídricos, com redução

do potencial produtivo dos cultivos. Isto é agravado pela ocorrência de período seco pronunciado (maio a setembro) e pela ocorrência de veranicos, classificando essa região como restrita à cafeicultura (Evangelista et al., 2002). Entretanto, nos últimos anos, o parque cafeeiro do Brasil tem se expandido para a região do Cerrado, utilizando-se de estratégias para mitigar os efeitos do déficit hídrico, a exemplo da irrigação, visto que a seca é considerada o maior estresse ambiental que reduz a produtividade na cafeicultura, podendo resultar em até 80 % de perdas (DaMatta et al., 2006).

Alguns cafeicultores do Alto São Francisco, região fisiográfica pertencente ao Cerrado mineiro, têm conseguido altas produtividades em sistemas não irrigados, contornando limitações edafoclimáticas da região utilizando-se de um conjunto de práticas de manejo, o que constitui um sistema de cultivo diferenciado, visando a maior exploração do solo pelo sistema radicular do cafeeiro com o intuito de aproveitar a água armazenada em profundidade, principalmente em Latossolos (Serafim, 2011). No entanto, essas observações até então empíricas sobre água em profundidade necessitam de respaldo científico que ateste que as plantas permanecem produtivas em função do maior aproveitamento deste recurso hídrico em função do manejo adotado. Maiores informações sobre o sistema de manejo podem ser encontradas em Serafim (2011). Nesse contexto, associado ao cenário de que os recursos hídricos superficiais outorgáveis para irrigação são cada vez mais escassos (ANA, 2011), estratégias que visem a otimização da água em sistemas agrícolas, como a melhoria do aproveitamento da água armazenada no solo em profundidade, carecem de estudos científicos.

No presente trabalho, uma área experimental envolvendo a adoção de um sistema de manejo de solo para a cafeicultura que faz uso de práticas que causam alterações favoráveis física e quimicamente sobre o ambiente radicular foi utilizada para testar as seguintes hipóteses: (1) Existe água disponível em

profundidade no perfil do solo, permitindo mitigação do estresse hídrico; (2) a construção da fertilidade química e física induz a expansão de raízes e consequentemente maior consumo hídrico na camada alterada pelo manejo. Assim, objetivou-se estudar a dinâmica do conteúdo de água armazenada no perfil de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro, no decorrer de 276 dias do ano de 2010, utilizando técnicas de geoestatística para gerar uma SCPT, avaliando a efetividade do manejo adotado.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área experimental de café *Coffea arabica* L. cultivar Catucaí, no espaçamento 2,5 x 0,65 m, com 2 anos de idade ao final deste trabalho. A área experimental está localizada no Município de São Roque de Minas, localizado na Região Fisiográfica Alto São Francisco, Estado de Minas Gerais, com coordenadas aproximadas de 20°15' S e 46°22' WGr. O clima da região é do tipo Cwa, segundo Köppen, sendo a precipitação média anual de 1.344 mm, com estação seca bem definida nos meses de maio a setembro; temperatura média anual de 20,7 °C; umidade relativa média de 60% e altitude média de 900 m (Menegasse et al., 2002).

A lavoura está situada em uma área de Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2006), sendo esta uma das principais unidades pedológicas da região. Alguns dados de caracterização do solo são apresentados na tabela 1. O manejo que vem sendo realizado segue o sistema de manejo descrito por Serafim (2011), destacando a formação de um sulco de plantio profundo, com 0,50 m de largura e 0,60 m de profundidade, onde são aplicados fertilizantes e corretivos. Neste sistema, adota-se o plantio antecipado das mudas; fornecimento de altas doses de gesso agrícola colocado na superfície do solo, na linha de plantio, para posterior incorporação; gradeamento da entrelinha previamente vegetada com

braquiária, e, amontoa desse material na linha de plantio, juntamente com o gesso agrícola. O sistema ainda apregoa o manejo efetivo da braquiária nas entrelinhas de cultivo com cortes periódicos, objetivando cobertura do solo da área e ciclagem de nutrientes, sem concorrência, entretanto, com a cultura principal.

As precipitações pluviais foram monitoradas por meio de pluviômetro instalado na área experimental, constantemente, logo após os eventos.

Os dados de conteúdo de água no solo foram obtidos por meio de uma sonda dotada de multi-sensores de capacitância (MCP) (*Profile probe –Delta T*, Cambridge, UK), que faz medições precisas em tempo real (aproximadamente 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> de precisão). Por não ser método destrutivo, é possível o monitoramentos em um mesmo local e em várias profundidades do solo. Foi realizada previamente a calibração desta sonda para condições específicas do solo em estudo, conforme metodologia adotada por [Silva et al. \(2011b\)](#). A sonda foi instalada na posição da linha de plantio do cafeeiro, entre duas plantas, com medições nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm, sendo as leituras iniciadas em 07/03/2010 e terminadas em 07/12/2010, totalizando 276 dias, abrangendo toda a estação seca de 2010. O armazenamento de dados foi feito por meio da instalação de data logger programado para receber dados de conteúdo volumétrico de água diariamente em intervalos de 4 horas (0:00, 04:00, 08:00; 12:00, 16:00, 20:00h). Para análise dos dados utilizou-se a média diária, com a finalidade de facilitar o processamento dos dados e principalmente a interpretação da SCPT.

A dependência espaço-temporal do conteúdo volumétrico de água no solo foi avaliada por meio da construção de semivariograma no programa Surfer 9.0, que é realizada pelos cálculos das semivariâncias segundo a equação 1:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde:  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i+h)$ , as quais estão separadas por uma distância  $h$ .

O semivariograma é representado pelo gráfico  $\gamma(h)$  versus  $h$ . Por meio desse gráfico ajustou-se a função esférica, onde foram determinados os seguintes parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0+C_1$ ) e o alcance ( $a$ ). O grau da dependência espaço-temporal (GD) foi calculado de acordo com Vieira (2000). Devido ao comportamento quadrático do conteúdo de água volumétrico tanto em profundidade como no período de tempo analisado, modelou-se a tendência dos dados por meio da função  $Z_1 = Z - [AX^2 + BY^2 + CXY + DX + EY + F]$ , onde  $Z_1$  é o conteúdo de água após a modelagem,  $z$  é o conteúdo de água,  $x$  é a variável tempo e  $y$  é a variável profundidade, e  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ , e  $F$  são os coeficientes de ajuste do modelo.

O estimador utilizado neste estudo para criar a SCPT foi a Krigagem (Vieira, 2000). Esta superfície foi gerada no Surfer 9.0 e importada para um sistema de informações geográficas para a divisão das classes de conteúdo de água no solo. As classes foram: < 5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, 45-50, >50 (% em volume).

A divisão das classes foi feita com o intuito de mostrar a variação temporal (no decorrer do tempo estudado) e espacial (no perfil do solo), visando identificar períodos e profundidades de déficit hídrico, de maior consumo hídrico pelo cafeeiro e de reposição da água no solo.

A partir da SCPT foi gerada uma superfície de disponibilidade de água para a planta (SDAP), classificando o conteúdo de água de acordo com as seguintes classes: água facilmente drenável (> 43 % em volume); água disponível para a planta (entre 43 e 24 % em volume) e água fortemente retida ao solo (< 24 % em volume). Os limites das classes foram atribuídos de acordo com os valores limítrofes de disponibilidade de água para as plantas (tabela 1), segundo o conceito clássico de capacidade de água disponível às plantas,

proposto por Veihmeyer & Hendrickson (1927, 1931, 1949) que considera igualmente e totalmente disponível às plantas a umidade entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Kirkham, 2005; Reichardt & Timm, 2004). A adoção desse conceito é útil, desde que se reconheça suas limitações, pois é baseado apenas em parâmetros do solo, desconsiderando as complexas relações do sistema solo-planta-atmosfera.

Para avaliar a acurácia da SCPT, utilizou-se a raiz do erro médio quadrático (RMSE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O RMSE mede a diferença entre os valores determinados e estimados. Portanto, quanto menor essa diferença, menor o RMSE, indicando maior precisão do ajuste. O  $R^2$  varia entre 0 e 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam melhor ajuste.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros do modelo de semivariograma ajustado (figura 1) estão apresentados na tabela 2. A dependência espaço-temporal foi classificada como forte, pois, segundo Cambardella et al. (1994), um grau de dependência menor que 25% ( $GD < 25\%$ ) indica forte dependência espaço-temporal.

Pela validação cruzada dos dados após a krigagem (figura 2), observa-se que houve um alto ajuste haja vista o coeficiente de determinação de 98%, corroborando a forte dependência espaço-temporal. O RMSE de 1,27% de conteúdo de água volumétrico também é indicativo de alta acurácia.

A superfície contínua profundidade x tempo (SCPT) é apresentada na figura 4, e na figura 3 está a superfície de disponibilidade de água à planta (SDAP). Pelas superfícies e mapas gerados é fácil observar que o conteúdo de água armazenado no solo foi altamente correlacionado ao montante e à distribuição das chuvas.

As precipitações pluviais no período estudado, compreendido entre 07/03/2010 e 02/12/2010, totalizaram 772 mm (figura 3). Quanto à distribuição

das chuvas, o maior período sem eventos foi de 113 dias, entre os dias 137 (17/maio) e 250 (07/setembro).

Em função da precipitação ocorrida no dia 250, houve uma elevação no conteúdo de água armazenado nas camadas superficiais que mostravam até então tendência de redução da umidade (figura 4). Com as chuvas praticamente diárias a partir do dia 270 (27/setembro), colocando fim à estação seca, houve reposição hídrica em praticamente todo o perfil do solo avaliado (figura 4). Entretanto, principalmente na camada de 0 a 50 cm, aproximadamente, fica nítido esse fato, pelo conteúdo de água atingir níveis acima do ponto de murcha permanente, mostrando água disponível para a planta (figura 5). O bulbo de umedecimento ocorrido em profundidade entre os dias 270 e 285 aproximadamente na camada de 85 a 100 cm (figuras 4 e 5), também pode ser atribuído às chuvas a partir do dia 270, somando-se às contribuições dos fluxos de água laterais que ocorrem no solo mas que não podem ser visualizados pelas superfícies.

No período compreendido entre os dias 146 (26/maio) e 270, na estação seca, ou seja, ausência total de precipitação (figura 3) houve redução da água armazenada no solo (figura 4) e conseqüentemente baixa disponibilidade hídrica às plantas (figura 5) desde a superfície até a profundidade de 75 cm aproximadamente. E, em alguns dias, a SDAP mostrou água fortemente retida ao solo até próximo de 100 cm.

Valores abaixo de 10% de água no solo foram encontrados somente próximo a superfície (profundidades menores que 15 cm), o que ocorreu entre os dias 115 (25/abril) e 140 (20/maio); 167 (16/junho) e 195 (14/julho); e 210 (29/julho) e 249 (06/setembro), aproximadamente. Isto aconteceu em virtude de que a camada superficial do solo é mais suscetível a perdas devido à ação da radiação solar e ao vento, que aceleram o processo de evaporação da água do solo. E, por outro lado é onde se recebe diretamente a água, pela precipitação, e, portanto, tem-se alta variação do armazenamento de água nessa camada (Hu et

al, 2010), até 30 cm de profundidade (figura 4), sobretudo quando se considera também a extração de água pelas raízes em alta atividade (González & Alves, 2005; Mota et al., 2011).

No entanto, entre os dias 130 (14/julho) e 147 (31/julho) o conteúdo de água volumétrico na superfície do solo permaneceu entre 10 e 15%, mesmo não apresentando reposição de água pela chuva (Figura 3), sendo essa reposição provavelmente relacionada com o movimento lateral, ou até mesmo vertical, tendo em vista as afirmações de Reichardt (1990) de que o movimento da água no solo pode ocorrer em todos os sentidos, salientando que a água é direcionada para pontos de menor estado de energia, ou seja, a água movimenta de um estado de maior potencial para o de menor potencial. O movimento da água no solo é função da sua estrutura. No perfil de solo estudado foi observado boa qualidade física do perfil do solo, expressa pelo alto índice S e macroporosidade (Silva et al., 2011a), mas principalmente com a continuidade dos poros que reflete na condutividade hidráulica, e portanto afeta positivamente a redistribuição da água no solo (Mello et al., 2011; Qiu, 2001).

Na camada de 20 a 30 cm observou-se maior conteúdo de água em relação à camada superficial, como também em relação à camada subjacente até próximo à profundidade de 80 cm (Figura 4). Salienta-se devido ao sistema de manejo empregado, nesta profundidade é onde se encontra uma camada de gesso acumulado e não dissolvido, com aproximadamente 3 cm de espessura, o que sugere que esta camada de gesso pode estar interferindo na retenção de água, fazendo-se necessário estudos pormenorizados que elucidem essa hipótese. Destaca-se ainda, que essa camada de solo sofre menor influência da radiação solar, o que contribui para a maior preservação da água nesta região. Outro ponto de destaque é a maior microporosidade nas profundidades de 5, 20 e 40 cm em relação às profundidades de 60 e 80 cm, encontrada por Silva et al. (2011a) ao estudar atributos físicos na mesma área experimental deste trabalho,

sugerindo que essa maior microporosidade pode estar associada a uma maior retenção de água nessas profundidades, como sinalizado em diferentes trabalhos (Assis et al., 2011; Silva et al., 2011a; Mazurana et al., 2011; Veiga et al., 2010; Leão et al., 2006), resultando assim em um maior conteúdo de água armazenado (figura 4), e também, em situações de água disponível como nos dias 66 à 121 e entre os dias 145 e 161 (figura 5).

Pela SCPT, observa-se um gradiente crescente do conteúdo de água a partir da profundidade de 55 cm até as camadas mais profundas. Este comportamento pode ser atribuído a extração de água pelas raízes, que causaram um gradiente decrescente do conteúdo de água das camadas mais profundas do solo até a profundidade de 60 cm. Isto é corroborado por Carlesso (2005) ao fazer revisão de literatura sobre o tema, onde descreve que a profundidade de extração de água pelas raízes pode ser caracterizada por uma frente de extração que avança no perfil do solo em função do tempo, com aproximadamente a mesma taxa de avanço do sistema radicular. Essa frente de extração de água em profundidade foi crescente desde o início da SCPT (dia 66) até o início da estação chuvosa, em setembro (dia 250), sendo maior entre os dias 160 e 240 (maio a setembro), no auge da estação seca na região.

O interrompimento da frente de extração de água que ocorreu a partir do dia 255 aproximadamente (figuras 4 e 5) pode estar associado ao reumidecimento do solo, tendo em vista o início do período chuvoso e aumento da água disponível nas camadas de 0 a 45 cm e 75 a 100 cm. Segundo Carlesso (1995), citando vários trabalhos, o retardo da frente de extração é função do balanço entre disponibilidade de água no solo e a demanda evaporativa. Assim, ele se dá em solos com elevada quantidade de água na faixa da disponibilidade, pelo reumidecimento do solo, ou por restrições químicas e físicas existentes no perfil do solo.

Pela SCPT e pela SDAP, ficou nítido o baixo conteúdo de água na camada de 45-75 cm em todo o período de tempo avaliado, podendo-se inferir que nesta profundidade do solo há uma maior atividade de absorção de água pelo sistema radicular do cafeeiro nas condições desse estudo (idade das plantas, material genético e sistema de manejo adotado). Salienta-se que o fundo do sulco preparado por ocasião do plantio se localiza a 60 cm de profundidade, e este sulco foi corrigido (calcário para 70% de saturação por bases) e recebeu adubação (formulado 08- 44-00 enriquecido com 1,0% Zn e 0,5% B, na dose de 980 kg ha<sup>-1</sup> e formulado 20-00-20, na dose de 530 kg ha<sup>-1</sup>), sendo revolvido, misturando os fertilizantes, por meio de uma “cavadeira adubadeira” do Tipo Mafes (Serafim, 2011), formando um “vaso” rico em nutrientes, e com ótimas condições físicas (Silva et al., 2011a). Como o crescimento das raízes se dá nas camadas em que há maiores teores de nutrientes e em condições adequadas, principalmente com teores adequados em Ca, Mg, P, N, B e reduzida atividade de Al trocável (Drew, 1975; Brito et al., 2009; Ragassi, 2007; Raij, 2008; Guimarães et al, 1992), sugere-se que nessa camada (45-75 cm, figura 5) o menor conteúdo de água se deve à maior atividade das raízes, extraíndo a maior parte da água demandada pela planta. Ademais, observa-se pela figura 6, uma grande quantidade de raízes nessa camada.

Em Piracicaba-SP, num Nitossolo Vermelho eutrófico, Silva et al. (2009) estimaram a extração de água no solo pelas raízes do cafeeiro, encontrando que 58% da extração ocorreu na camada de 0-30 cm, e apenas 10% em profundidades maiores que 100 cm. Porém nesse trabalho, não foram adotadas práticas de manejo especialmente visando o aprofundamento radicular e, além disso houve boa precipitação pluvial e irrigação complementar, portanto não estimulando o aprofundamento radicular pelo déficit hídrico (Santos & Carlesso, 1998). A atividade das raízes do cafeeiro arábica varia muito no perfil do solo bem como ao longo das estações climáticas correlacionada com o

crescimento das raízes que é sazonal e geralmente precede o início do crescimento da parte aérea (DaMatta et al., 2007). No Quênia, depois de longo período de seca, a maior atividade da raiz do cafeeiro foi observada entre as camadas de 45 e 75 cm de profundidade (Huxley et al., 1974). Daker (1976) propôs como profundidade efetiva de raiz para absorção de água do cafeeiro a camada de 60 a 80 cm, corroborando dessa forma com a região de menor conteúdo de água apresentada pela SCPT. Uma ressalva é que no presente estudo as plantas ainda não atingiram o período de produção ou idade adulta (4 – 5 anos), configurando expectativa de maior crescimento radicular e consequente deslocamento da frente de extração de água para camadas mais profundas.

Chama-se também a atenção para o conteúdo de água acima dos 30%, principalmente na camada de 80 e 100 cm, entre os dias 66 (07/março) e 167 (16/junho), e do dia 200 (19/julho) ao dia 301 (28/outubro) (Figura 4). Isso acontece em solos profundos e bem drenados, cuja água atinge camadas profundas durante a época chuvosa, sendo considerada como perdida do ponto de vista agrônomo, porém importante do ponto de vista ambiental por promover a recarga do lençol freático e o abastecimento dos mananciais hídricos da região. Essa água prontamente disponível (figura 5) poderá ser utilizada pelas plantas, em função do manejo adotado que incentiva o desenvolvimento radicular. Vários estudos têm demonstrado que raízes que se desenvolvem em profundidade são tão ou mais eficientes que as superficiais em absorver água e nutrientes (Wiersum, 1957), e que a água se move passivamente através das raízes das plantas entre as camadas profundas do solo e superficial ao longo de gradientes potencial hídrico, resultando em benefícios para as plantas (McCulley et al., 2004), o que justifica o manejo do solo visando o condicionamento, ou melhoria físico-química do perfil do solo.

Destaca-se ainda a ocorrência de um veranico de aproximadamente 15 dias, ocorrido entre outubro e novembro (dias 290 a 306), ocasionando

secamento até a profundidade de 25 cm. Ou seja, a profundidade de 25 cm atingiu o ponto de murcha permanente, sendo corroborado pela ausência de chuvas entre os dias 287 e 304. Isto mostra e reitera a importância da maior exploração do perfil do solo pelo sistema radicular.

Como a profundidade de extração de água é preponderante sobre a quantidade potencial extraível por unidade de profundidade, no contexto da capacidade de disponibilizar água do solo, sistemas radiculares profundos podem melhorar a produtividade da cultura submetida a condições de déficit hídrico, pela manutenção da fotossíntese, e do fluxo transpirativo com maior absorção de nutrientes (Carlesso, 2005; Ragassi, 2007; DaMatta, 2007). Entretanto, DaMatta et al. (2007) alertam que essa estratégia pode envolver consumo de fotoassimilados nas raízes em detrimento da parte aérea, com possíveis reflexos na produção, mas não há estudos específicos comparando produtividade das plantas com mesma idade, mas com diferentes arquitetura e atividade de raízes no perfil do solo.

Na área experimental do presente estudo, em 28 de agosto de 2010, Castro et al. (2011) realizaram um trabalho preliminar avaliando a distribuição quantitativa do sistema radicular pela metodologia do perfil cultural. Os autores observaram que há distribuição de raízes em todo o perfil avaliado, até 150 cm de profundidade, e que o preparo profundo do sulco de plantio associado ao uso de gesso agrícola proporcionou maior volume de solo explorado. Com base nessas informações, e considerando que as observações de Wiersum (1957), de que as raízes localizadas nas camadas mais profundas do solo possuem alta atividade de absorção de água e nutrientes, sugere-se que há extração de água em profundidade (figuras 4 e 5), o que contribui para redução do estresse hídrico pela planta causado pelo período de seca e pelo veranico relatados anteriormente, com possíveis reflexos na produtividade.

## CONCLUSÕES

1. Há alta dependência espaço-temporal do conteúdo de água volumétrico no solo em relação à profundidade e período avaliado, evidenciado pelo GD e pelo semivariograma;
2. A SCPT gerada pela krigagem apresentou alta acurácia (baixo RMSE e alto  $R^2$ );
3. A SCPT possibilitou observar a influência da pluviosidade, extração de água e redistribuição da água na dinâmica espaço-temporal do conteúdo de água armazenado no perfil do solo;
4. A camada mais superficial do solo é a que apresenta maior variabilidade do conteúdo de água no solo no período estudado;
5. A camada de 50 a 75 cm apresentou menor conteúdo de água em todo período avaliado, sugerindo maior atividade do sistema radicular em absorver água nessa camada devido ao sistema de manejo adotado;
6. Pela SDAP, pode-se inferir que abaixo de 80 cm há água disponível para a planta ao longo de todo o período avaliado, demonstrando a importância do manejo visando o aproveitamento dessa água, reduzindo efeito de estresse hídrico na planta ocasionado pelo déficit hídrico na camada de maior atividade de raízes no período de seca, e, por veranico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor; à FAPEMIG e Embrapa Café pelo financiamento do projeto, e à EPAMIG e Empresa AP (na pessoa dos Agrônomos Alessandro de Oliveira e Joyce Cristina Costa) pelo apoio logístico e auxílio em trabalhos de campo.

## LITERATURA CITADA

- ANA. Agencia Nacional de Águas – Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. <[http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/abr\\_nacional.htm](http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/abr_nacional.htm)>. March 01, 2011.
- Assis, A.C.C., Coelho, R.M., Silva, E.P., Durigan, G., 2011. Water availability determines physiognomic gradient in an area of low-fertility soils under Cerrado vegetation. *Plant Ecology* 212, 1135-1147. doi:10.1007/s11258-010-9893-8
- Bamberg, A.L., Cornelis, W.M., Timm, L. C., Gabriels, D., Pauletto, E.A., Pinto, L.F.S., 2011. Temporal changes of soil physical and hydraulic properties in strawberry fields. *Soil Use and Management* 27, 385–394. doi:10.1111/j.1475-2743.2011.00355.x
- Brito, A.D.S., Libardi, P.L., Ghiberto, P.J., 2009. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 295-303.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlem, D.L., Turvo, R.F., Konopa, A.E., 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Science Society of America Journal* 47, 1501-1511.
- Carlesso, R, 1995. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Revista Ciência Rural* 25, 183-188.
- Castro, E.M., Oliveira, G.C., Barbosa, S.M., Carducci, C.E., Zeviani, W.M., 2011. (July 31 - August 05). Avaliação quantitativa do sistema radicular de cafeeiro sob sistema conservacionista e de manejo intensivo em Latossolo vermelho distrófico. Anais do 33º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 31 July - 05 August 2011, Uberlândia, Brazil, CD-ROM.
- Daker, A., 1976. A água na agricultura: Manual de hidráulica agrícola, fifth ed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro.
- DaMatta, F.M., Ronchi, C.P., Maestri, M., Barros, R.S., 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19, 485-510.
- DaMatta, F.M., 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18, 55-81.
- Drew, M.C., 1975. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. *New Phytologist* 75, 479-490.
- Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos, second edition. Embrapa Produção de informação, Rio de Janeiro.
- Evangelista, A.W. P., Carvalho, L.G. de, Sedyama, G.C., 2002. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 6, 445-452.

- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23, 513-524.
- González, A.P., Alves, M.C., 2005. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície, em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental* 9, 45-50.
- Grego, C.R., Vieira, S.R., Antonio, A.M., Della Rosa, S.C., 2006. Geostatistical analysis for soil moisture content under the no tillage cropping system. *Scientia Agrícola* 63, 341-350.
- Guimarães, P.T.G., 1992. (March 24 – 26). O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. *Anais do Seminário Sobre o Uso do Gesso na Agricultura*. 24-26 March 1992, Uberaba, Brazil.
- Herbst, M., Diekkrüger, B., 2003. Modeling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. *Physics and Chemistry of the Earth* 28, 239-245.
- Hu, W., Shao, M., Han, F., Reichardt, K., Tan, J., 2010. Watershed scale temporal stability of soil water content. *Geoderma* 158, 181-198.
- Huxley, P.A., Patel, R.Z., Kabaara, A.M., Mitchell, H.W., 1974. Tracer studies with P on the distribution of functional roots of Arabica coffee in Kenya. *Annals of Applied Biology* 77, 159-180.
- Kirkham, M.B., 2005. *Principles of Soil and Plant Water Relations* Elsevier Academic, Boston.
- Leão, T.P., Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S., Euclides, V.P.B., 2006. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Tillage and Research* 88, 279-285.
- Mazurana, M., Levien, R., Muller, J., Conte, O., 2011. Sistemas de preparo do solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35, 1197-1206.
- McCulley, R.L., Jobbágy, E.G., Pockman, W.T., Jackson, R.B., 2004. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia* 141, 620-628.
- Mello, C.R. de., Ávila, L.F., Norton, L.D., Silva, A.M., Mello, J.M. de., Beskow, S., 2011. Spatial distribution of top soil water content in an experimental catchment of Southeast Brazil. *Scientia agrícola* 68, 285-294.
- Menegasse, L.N., Gonçalves, J.M., Fantinel, L.M., 2002. Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Revista Águas Subterrâneas* 16, 9-21.
- Mota, J.C.A., Libardi, P.L., Brito, A. dos S., Júnior, R.N. de A., Filho, J.A., 2010. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 1721-1731.

- Oliveira, G.C. de, Dias Junior, M.S., Resck, D.V.S., Curi, N., 2004. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28, 327-336.
- Qiu, Y., Fu, B., Wang, J., Chen, L., 2001. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology* 240, 243-263.
- Raij, B. van, 1988. Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo, Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, São Paulo.
- Raij, B. van, 2008. Gesso na agricultura, Instituto Agronômico, Campinas.
- Reichardt, K., 1990. A água em sistemas agrícolas. Manole, São Paulo.
- Reichardt, K., Silva, J.C.D. A., Bassoi, L.H., Timm, L.C., Oliveira, J.C.M.D., Bacchi, O.O.S., Pilotto, J.E., 2001. Soil spatial variability and the estimation of the irrigation water depth. *Scientia Agrícola* 58, 549-553.
- Reichert, J.M., Dariva, T.A., Reinert, D.J., Silva, V.R.D., 2008. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. *Ciência Rural* 38, 981-988.
- Santos, R.F., Carlesso, R., 1998. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 2, 287-294.
- Serafim, M.E., 2011. Manejo do solo na melhoria de atributos físico-hídricos e químicos para a cultura do cafeeiro. Doctorate thesis, Federal University of Lavras. 119 pp.
- Silva, A.L. da, Bruno, I.P., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., Dourado-Neto, D., Favarin, J.L., Costa, F.M.P. da, Timm, L.C., 2009. Soil water extraction by roots and Kc for the coffee crop. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 257-261.
- Silva, A.P., Nadler, A., Kay, B., 2001. Factors contributing to temporal stability in spatial patterns of water content in the tillage zone. *Soil and Tillage Research* 58, 207-218.
- Silva, B.M.; Oliveira, G.C.; Silva, E.A.; Oliveira, L.M.; Serafim, M.E.; Souza, Z.R. (July 31 - August 05). Efeitos do manejo conservacionista do cafeeiro sob a qualidade física e estrutural de um Latossolo em ambiente de cerrado. *Anais do 33º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*. 31 July - 05 August 2011, Uberlândia, Brazil, CD-ROM.
- Silva, B.M.; Oliveira, L.M.; Rezende, E.M.; Silva, E.A.; Serafim, M.E. (July 24-27). . Medição da umidade do solo por sondas de multisensores de capacitância em Latossolo, acurácia e calibração. *Anais do 40º Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*. 24-27 July 2011b, Cuiabá, Brazil, CD-ROM.
- Silva, G.L., Lima, H., Campanha, M.M., Gilkes, R.J., Oliveira, T.S., 2011c. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and

conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region.

*Geoderma* 167-168, 61-70.

Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, second ed., USDA Soil Conservation Service, US Gov. Printing Office, Washington, DC. <<http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy>>.

Tormena, C.A., Silva, A.P da, Libardi, P.L., 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research* 52, 223-232.

Veiga, M., Reinert, D.J, Reichert, J.M., 2010. Tillage systems and nutrient sources affecting soil cover, temperature and moisture in a clayey oxisol under corn. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 2011-2020.

Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H., 1927. The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Proc. 1st Intern. Congr. Soil Science*, 3, 498-513.

Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H., 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science* 32, 181-194.

Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H., 1949. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Science* 68, 75-94.

Vieira, S.R., 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo, in: Novais, R.F., Alvarez, V., Schaefer, V.H., Schaefer, C.E.G.R. (Eds). *Tópicos em ciência do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 1-53.

Vinnikov, K.Y., Robock, A., Speranskaya, N.A, Schlosser, C.A., 1996. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture. *Journal of Geophysical Research* 101, 7163-7174.

Western, A.W., Zhou, S.-L., Grayson, R.B., McMahon, T.A., Blöschl, D.J.W., 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology* 286, 113-134.

Wiersum, L.K., 1967. Potential subsoil utilization by roots. *Plant and soil* 27, 267-274.

Zanette, S.V., Sampaio, S.C., Silvestre, M.G., Boas, M.A.V., Uribe-Opazo, M.A., Queiroz, M.M.F.de, 2007. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11, 239-247.

Tabela 1. Valores médios para o perfil do solo, entre 0 e 1 m de profundidade, para granulometria, densidade e retenção de água.

Textura <sup>1</sup>			Retenção de água			
Argila	Silte	Areia	Ds <sup>2</sup>	CC <sup>3</sup>	PMP <sup>4</sup>	CAD <sup>5</sup>
-----g kg <sup>-1</sup> -----			g.cm <sup>-3</sup>	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
791	173	36	0,84	0,43	0,24	0,19

1. Análise granulométrica pelo método da pipeta; 2. Densidade do solo determinada pelo método do anel volumétrico, obtidas em Silva et al. (2011a); 3. Capacidade de campo, obtida pelo equilíbrio de amostras indeformadas em unidade de sucção ao potencial de -6 kPa (Oliveira et al., 2004); 4. Ponto de murcha permanente, determinado em Câmara de Richards ao potencial de -1500 kPa. 5. Capacidade de armazenamento de água disponível (CC – PMP)

Tabela 2. Modelo; valores do alcance (a); patamar (C<sub>0</sub>+C); efeito pepita (C<sub>0</sub>); grau de dependência (GD) e classe do grau de dependência para estudo do conteúdo de água no solo (□).

Propriedade	Modelo	a (cm <sup>2</sup> +dia <sup>2</sup> ) <sup>1/2</sup>	C <sub>0</sub> +C	C <sub>0</sub>	GD	Classe do GD
□	Esférico	38	62	0,1	0,16%	Forte

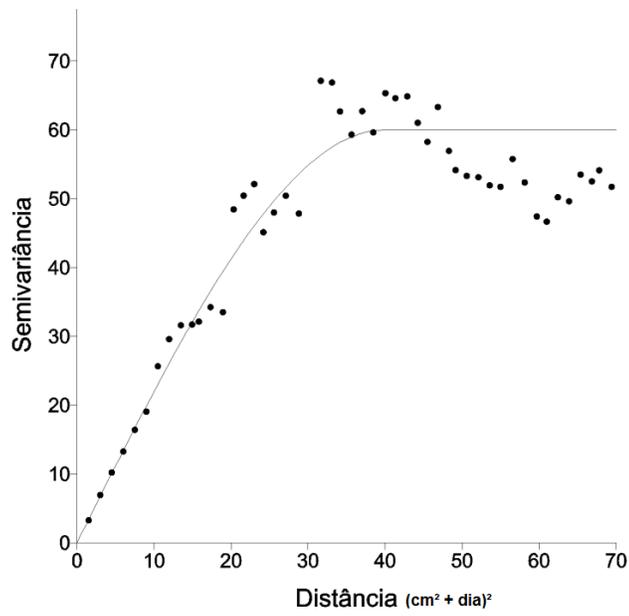


Figura 1. Semivariograma ajustado com o modelo esférico.

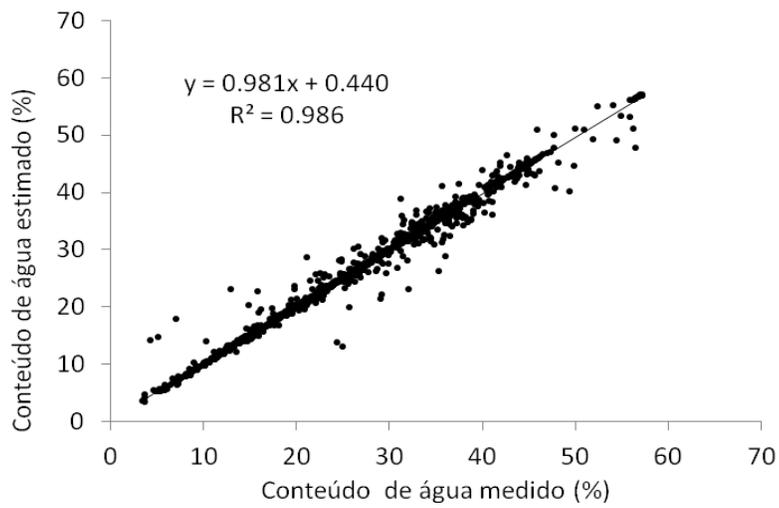


Figura 2. Valores medidos versus estimados, validação cruzada da krigagem.

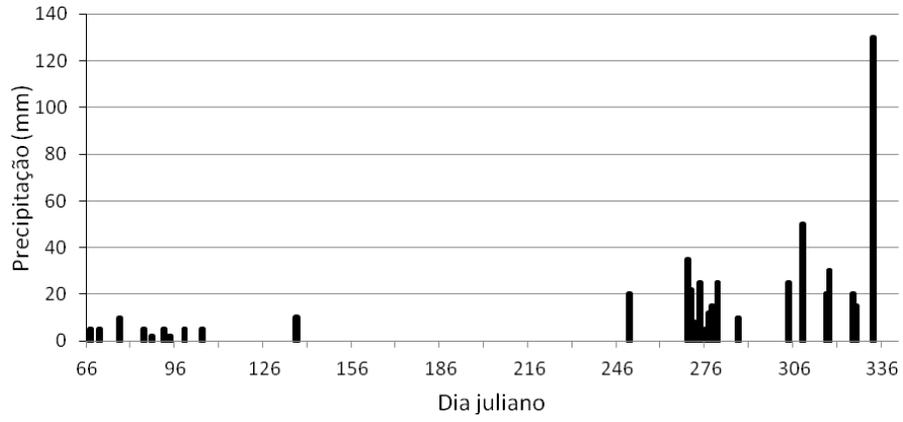


Figura 3. Precipitação pluvial no período de tempo estudado

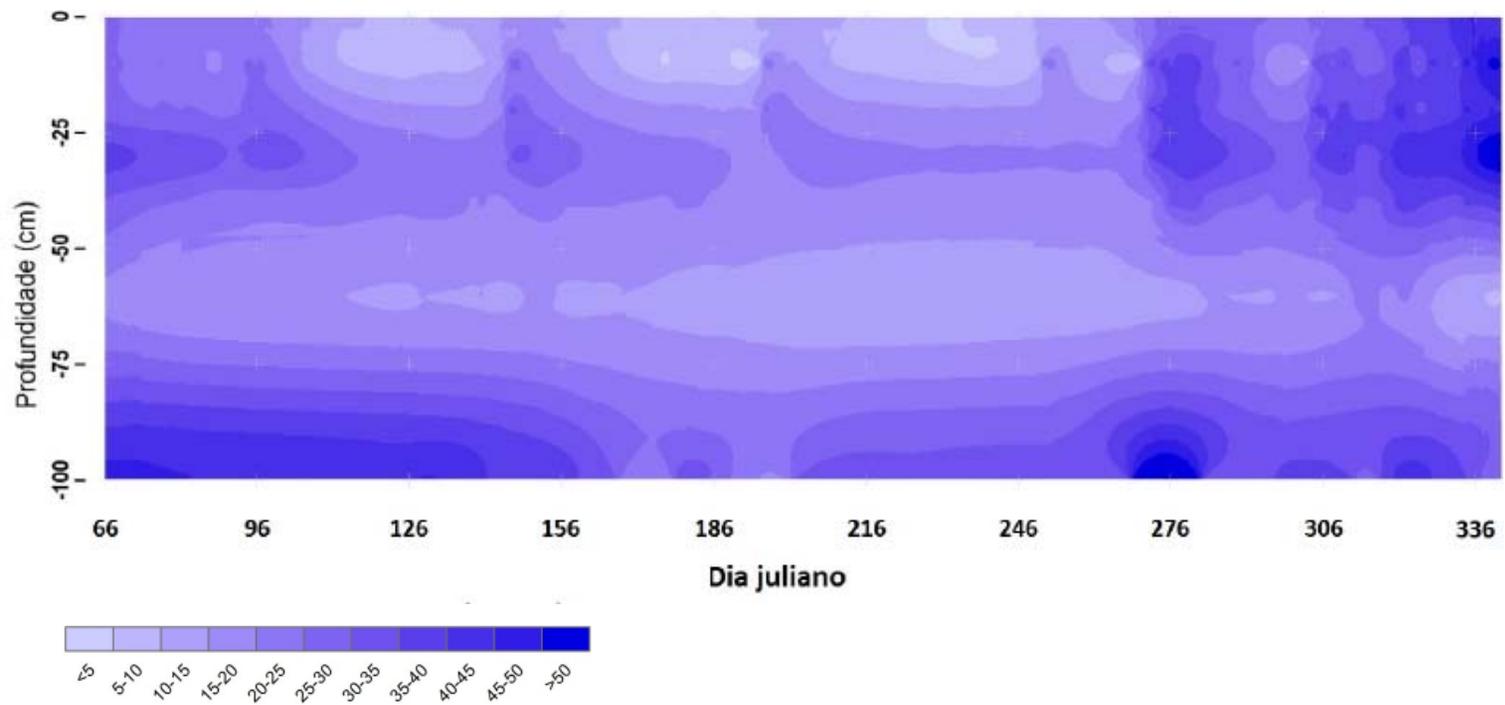


Figura 4. Superfície contínua de profundidade x tempo (SCPT) do conteúdo volumétrico de água no solo, dados em % (7/03/2010 a 02/12/2010).

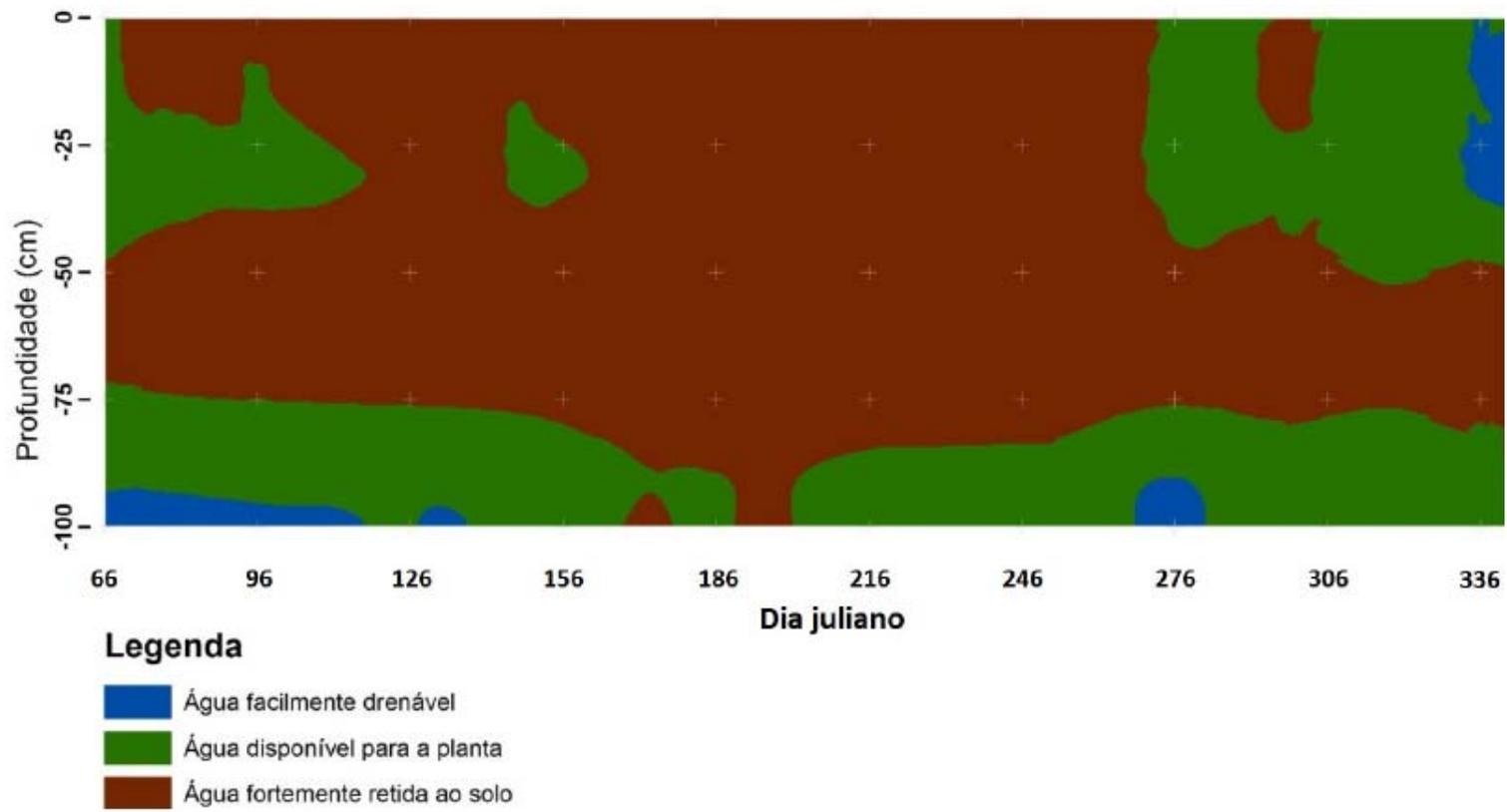


Figura 5. Superfície de disponibilidade de água para a planta (SDAP) (7/03/2010 a 02/12/2010).



Figura 6. Exposição do sistema radicular do cafeeiro por meio de trincheira realizada em 08/12/2009, final do primeiro ano de idade das plantas, e, portanto precedente às avaliações de umidade.